

A BIOSZFÉRA SZEREPE A LÉGKÖR SZÉN-DIOXID TARTALMÁNAK ALAKULÁSÁBAN

OTKA T042941

ZÁRÓJELENTÉS

Témavezető:

Haszpra László

Országos Meteorológiai Szolgálat

Budapest, 2008

TARTALOMJEGYZÉK

1. BEVEZETÉS	3
2. MÉRÉSEK	4
2.1. Mérőhely	4
2.2. Szén-dioxid koncentráció mérések és a kapcsolódó meteorológiai megfigyelések.....	4
2.3. A felszín és a légkör közötti szén-dioxid forgalom mérése	4
2.4. A metán, a dinitrogén-oxid, a kén-hexafluorid és a szén-monoxid folyamatos mérése .	5
2.5. Eseti levegőminta-vételek	5
2.6. Repülőgépes mérések	6
3. A MÉRÉSI ADATOK ÉRTÉKELÉSE.....	6
3.1. A szén-dioxid koncentráció mérések területi reprezentativitása.....	6
3.2. A felszín-légkör szén-dioxid áram mérések területi reprezentativitása	6
3.3. Nem-CO ₂ üvegházgázok mérésének területi reprezentativitása	9
3.4. A szén-dioxid koncentráció mérések eredményeinek elemzése	10
3.5. A felszín és a légkör közötti szén-dioxid forgalom mérések eredményeinek elemzése	14
3.6. A metán, a dinitrogén-oxid, a kén-hexafluorid mérések eredményeinek értékelése	16
3.7. Eseti levegőminta-vételek	19
3.8. Repülőgépes mérések	19
4. MODELLEZÉSI TEVÉKENYSÉG	20
4.1. Forrásterület modell	20
4.2. CO ₂ források/nyelők területi elhelyezkedésének meghatározása (CO ₂ -térkép).....	20
4.3. Box-modell a felszín-légkör kicserélődés leírására	20
4.4. A Biome-BGC modell.....	22
5. PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG.....	24
6. IRODALOMJEGYZÉK.....	26
MELLÉKLET	29

1. BEVEZETÉS

Bolygónk meglehetősen hűvös hely lenne a légkör üvegházhatása nélkül. Szerencsére a Föld légköre számos olyan nyomgázt tartalmaz, amely elnyeli a felszín infravörös tartományba eső hőmérsékleti kisugárzását. Az ily módon elnyelt energia egy részét a légkör visszasugározza megnövelve a felszín hőmérsékletét. A légkör üvegházhatásában a legnagyobb szerepet a vízgőz (H_2O), a szén-dioxid (CO_2), a metán (CH_4), a nitrogén-dioxid (N_2O) és az ózon (O_3) játssza. Bármilyen változás ezeknek az üvegházhatású gázoknak a légköri mennyiségében megváltoztatja az energia-eloszlást a felszín-légkör rendszerben, és ezzel megváltoztatja a felszín hőmérsékletét, azaz az üvegházhatású gázok mennyiségének változása törvényszerűen globális éghajlatváltozáshoz vezet. Az üvegházhatású gázok mennyisége és az éghajlat közötti összefüggés azonban rendkívül összetett a számtalan visszacsatolás és kölcsönhatás miatt.

A vízgőz légköri mennyisége túl nagy, légköri tartózkodási ideje pedig túl rövid ahhoz, hogy mennyiségét az emberi tevékenység közvetlenül módosíthassa. Ugyanakkor a jégbe fagyott levegőzárványok és a közvetlen légköri mérések azt jelzik, hogy a többi üvegházhatású gáz mennyiségét illetően egyre nagyobb az emberi befolyás. Az ipari forradalom kezdete, a 18. század közepe óta a szén-dioxid légköri koncentrációja 35%-kal, a nitrogén-dioxidé kb. 20%-kal, a metáné pedig mintegy 150%-kal nőtt. Az emberi tevékenységnek köszönhetően olyan üvegházhatású gázok is megjelentek a légkörben, amelyeknek természetes forrása egyáltalán nincs (pl. halogénezett szénvegyületek). Az erősödő üvegházhatás által kiváltott, és a jövőben tovább erősödő éghajlatváltozás napjaink legfontosabb környezeti problémájává vált.

Bár az éghajlatváltozás és a légkör metán, valamint dinitrogén-oxid tartalma között is van kölcsönhatás az éghajlatnak a forrásokra gyakorolt hatása révén, a legintenzívebb kapcsolat a szén-dioxid és az éghajlat között van. A légköri szén-dioxidnak ugyanis forrása és nyelője is a bioszféra, amely rendkívül érzékenyen reagál az éghajlat változására. A bioszféra aktivitásának változása pedig befolyásolja szén-dioxid forgalmát, ezen keresztül a légkör szén-dioxid tartalmát, végső soron pedig magát az éghajlatot. Ezért az üvegházhatású gázok mennyiségének figyelemmel kísérése mellett jelenleg a bioszféra viselkedésének kutatása képezi az egyik legfontosabb szeletét az éghajlatkutatásnak.

Magyarországon 1981-ben kezdődött meg a légkör szén-dioxid koncentrációjának folyamatos mérése. 1994 óta működik a hegyhátsági mérőállomás, ahol 115 m magasságig több szintben folyik e fontos üvegházhatású gáz mennyiségének folyamatos megfigyelése, meteorológiai alapmérésekkel kiegészítve. Itt 1993 óta rendszeres levegőmintavételek is történnek, mely mintákból az Amerikai Egyesült Államok Országos Óceán- és Légkörkutató Hivatala (National Oceanic and Atmospheric Administration – NOAA) számos nem- CO_2 üvegházhatású gáz mennyiségét határozza meg. 1997-ben telepítettük a mérőtorony 82 m-es szintjére azt az eddy-kovariancia elven működő műszeregyüttest, amellyel a régió ökológiai rendszerei és a légkör közötti szén-dioxid forgalom mérhető.

Jelen kutatási pályázat célja a mérőrendszer fenntartása és további bővítése mellett a mérési adatok értékelése és értelmezése volt. Ennek során szenzorokat telepítettünk a talaj állapotának folyamatos nyomonkövetésére, felállítottunk egy második eddy-kovariancia mérőrendszert, amellyel specifikusan egy kvázi-természetes gyeper szén-dioxid forgalmát tudjuk figyelemmel kísérni. Létrehoztunk és üzembe helyeztünk egy automatikus gázkromatográfiás rendszert, amely lehetővé teszi a metán, a dinitrogén-oxid és a kénhexafluorid légköri koncentrációjának folyamatos mérését. Az Európai Unió támogatásának köszönhetően 2006-2007-ben nagy gyakorisággal végezhattünk repülőgépes méréseket a

hegyhátsági mérőtorony felett, így a szén-dioxid függőleges koncentráció-eloszlását 3000 m magasságig követhettük.

Megvizsgáltuk a szén-dioxid mérések területi reprezentativitását. Feldolgoztuk és értékeltük az elmúlt évek során végzett üvegházgáz mérések eredményeit, beleértve a jelen projekt keretében indított új mérésekét is. Kifejlesztettünk egy egyszerű box-modellt a légköri határrétegben zajló szinoptikus skálájú koncentráció-változások vizsgálatára. Sikeresen adaptáltuk a Biome-BGC folyamatorientált ökológiai rendszer modellt, amellyel le tudjuk írni a bioszféra jelenlegi és feltételezhető jövőbeni szén-dioxid forgalmát.

A pályázathoz benyújtott munkatervet lásd a Mellékletben.

2. MÉRÉSEK

2.1. MÉRŐHELY

A hazai üvegházgáz kutatások bázisa az Antenna Hungária Rt. (AH Rt.) hegyhátsági (Vas megye, 46°57'N, 16°39'E) adóállomása, ahol az AH Rt. a 117 m magas adótorony mérési célú használatát természetbeni támogatásként nyújtja kutatási programjainkhoz. Az adóállomás 8 km-es körzetében csak kis lélekszámú (100-400 lakos) települések találhatók, amelyeken ipari tevékenység nem folyik. A legközelebbi nagyobb település Kőrmend (kb. 13 ezer lakos), amely az állomástól mintegy 9 km-re északnyugatra található. Említésre méltó légszennyezéssel járó ipari tevékenységet azonban itt sem végeznek. A településeket összekötő úthálózat forgalma csekély. Az állomás közelében húzódó egyetlen, viszonylag nagyobb forgalmú közút a Kőrmendet Zalaegerszeggel összekötő 76-os számú főút, amelyen naponta átlagosan 3600 jármű halad át. Ennek a közútnak a legközelebbi pontja 400 m-re délnyugatra van az adóállomástól. Mindezeket a tényezőket figyelembe véve az adóállomáson kialakított mérőhelyet közvetlen antropogén szennyezéstől közép-európai értelemben véve mentesnek, az itt mért adatokat regionális háttér-koncentrációknak tekinthetjük. A viszonylagos szennyezés-mentességet a későbbiekben a kén-hexafluorid mérésekkel bizonyítjuk is.

2.2. Szén-dioxid koncentráció mérések és a kapcsolódó meteorológiai megfigyelések

A légköri szén-dioxid koncentráció folyamatos mérése 1994 szeptembere óta folyik a hegyhátsági adótorony négy szintjén: 10 m, 48 m, 82 m és 115 m. Ugyanezek a szintek meteorológiai méréseket (szél, hőmérséklet, légnedvesség) is végzünk. 2 m-es magasságban mérjük a Nap teljes rövidhullámú sugárzását (globálisugárzás), a fotoszintetikusan aktív sugárzást és a felszín sugárzásegyenlegét. A jelen kutatási téma kezdetén, a bioszféra viselkedését leíró modellek adatigénye miatt, a mérőrendszert talajérzékelőkkel (talajhőmérséklet, talajnedvesség, talajhőáram) egészítettük ki. Az elmúlt években csapadékmérő és légköri nyomás mérő eszköz telepítésére is sor került.

2.3. A felszín és a légkör közötti szén-dioxid forgalom mérése

A felszín és a légkör közötti függőleges anyagáramot napjainkban csaknem kizárólagosan eddy-kovariancia elven mérik. Ennek lényege, hogy egyidejűleg mérik a függőleges légáramlás és a vizsgált nyomanyag koncentrációjának fluktuációját. Amennyiben a felfelé irányuló légmozgásnál pozitív koncentráció-anomália észlelhető, akkor az anyagáram a felszín felől a légkörbe irányul, míg negatív anomália esetén a légkörből a felszín felé. A légköri fluktuációk karakterisztikus idejét figyelembe véve olyan rövid

válaszidejű mérőeszközöket kell használni, amelyek másodpercenként 4-10 mérést is képesek végezni.

A hegyhátsági torony 82 m-es szintjén 1997 óta működik egy ilyen mérőrendszer, mely felszín feletti magassága miatt jelentős területek szén-dioxid forgalmát reprezentálja (lásd később). A nagy magasság azonban – a légkör rétegzettsége miatt – komoly módszertani problémákat is felvet, melyek egy részének megoldása már e kutatási téma keretében történt meg.

A 82 m-en elhelyezett mérőrendszer egy döntően mezőgazdasági terület szén-dioxid forgalmát reprezentálja. Európában jelentős területeket foglalnak el a gyepek, amelyek szén-dioxid forgalmáról korábban kevés szó esett. E kutatási téma keretében 2005 végén Hegyhátsálon létrehoztunk egy második eddy-kovariancia mérőrendszert is, amely a torony közelében lévő kvázi-természetes fajösszetételű gyep szén-dioxid forgalmát méri.

2.4. A metán, a dinitrogén-oxid, a kén-hexafluorid és a szén-monoxid folyamatos mérése

A kutatási téma keretében, Európai Unió műszertámogatás felhasználásával, 2006 elején indítottuk meg Hegyhátsálon a metán (CH_4), a dinitrogén-oxid (N_2O), a kén-hexafluorid (SF_6) és a szén-monoxid (CO) kvázi-folyamatos mérését. A mérésekhez egy lángionizációs és elektronbefogásos detektorral felszerelt, automatikus mintaadagolású gázkromatográfot használunk. A mérendő levegő a torony 96 m-es szintjéről érkezik. Egy-egy analízis időtartama 10 perc, így 10 perces időbeni felbontásban állnak rendelkezésünkre az adatok. A metán és a dinitrogén-oxid fontos, jelentős természetes forrásokkal is rendelkező üvegházhatású gáz. A kén-hexafluorid gyakorlatilag kizárólag emberi eredetű (alumíniumipar, nagyfeszültségű elektromos berendezések). Légköri tartózkodási ideje mintegy 3000 év, üvegház potenciálja magas. A rendszer lehetővé teszi a szén-monoxid mérését is, ami az ózonképződésben játszott szerepe miatt indirekt üvegházhatású gáz. Emellett a közvetlen antropogén szennyezés indikátora, mivel jelentős része a fosszilis tüzelőanyagok, illetve a biomassza égetése során keletkezik.

2.5. Eseti levegőminta-vételek

A hegyhátsági mérőállomás része az Amerikai Egyesült Államok Országos Óceán- és Légkörkutató Hivatala (NOAA) által fenntartott globális üvegházgáz megfigyelő hálózatnak. A hálózatban heti rendszerességgel vesznek levegőmintákat, amelyeket a NOAA boulderi (Colorado, U.S.A.) laboratóriuma elemez számos nyomgázra (CO_2 , CH_4 , N_2O , SF_6 , CO , H_2). A NOAA-val együttműködő Institute of Arctic and Alpine Research (INSTAAR – Boulder, Colorado, U.S.A.) meghatározza a szén-dioxid (néhány állomás esetében a metán) stabilizotóp ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) összetételét. A hegyhátsági mintavétel program 1993 tavaszán kezdődött. A levegőminták a torony 96 m-es szintjéről származnak. A NOAA mérései függetlenek az állomáson végzett in-situ mérésektől, így az eredmények összehasonlítása fontos információt nyújt a mérések megbízhatóságáról.

A Groningeni Egyetemen (Groningen, Hollandia) együttműködve olyan mintavevő rendszert telepítettünk a hegyhátsági mérőállomáson, amely távvezérelve működtethető és 20 levegőminta vételére alkalmas. Ennek segítségével a levegő összetételének időbeli menete is vizsgálható. A mintákat a Groningeni Egyetem Izotópkutató Központja elemzi N_2/O_2 arányra, CO_2 stabilizotóp összetételre ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$) és néhány nyomgázra (CO_2 , CO).

2.6. Repülőgépes mérések

Az Európai Közösség 6. K+F Keretprogramjához tartozó CarboEurope Integrated Projekt lehetővé tette, hogy a hegyhátsági torony felett rendszeres repülőgépes méréseket végezzünk a légköri határréteg, illetve a szabad troposzféra alsó részének üvegházgáz összetételére vonatkozóan. 2006 elejétől 2008 végéig évi 80 repülőgépes mérést tesz lehetővé az anyagi támogatás. A felszállások során a talajszint feletti 200-250 m-es magasságtól 3000 m-ig folyamatosan mérjük a levegő szén-dioxid koncentrációját (a mérés időbeni felbontása 1 másodperc, ami kb. 2-3 m-es magasság szerint felbontásnak felel meg). Átlagosan minden negyedik felszállás során hét magassági szintben (250 m, 500 m, 1000 m, 1500 m, 2000 m, 2500 m, 3000 m) levegőmintákat is veszünk, amelyeket a francia Éghajlat- és Környezettudományi Laboratórium (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement – LSCE, Gif-sur-Yvette, Franciaország) elemez a fontosabb üvegházhatású gázokra.

3. A MÉRÉSI ADATOK ÉRTÉKELÉSE

3.1. A szén-dioxid koncentráció mérések területi reprezentativitása

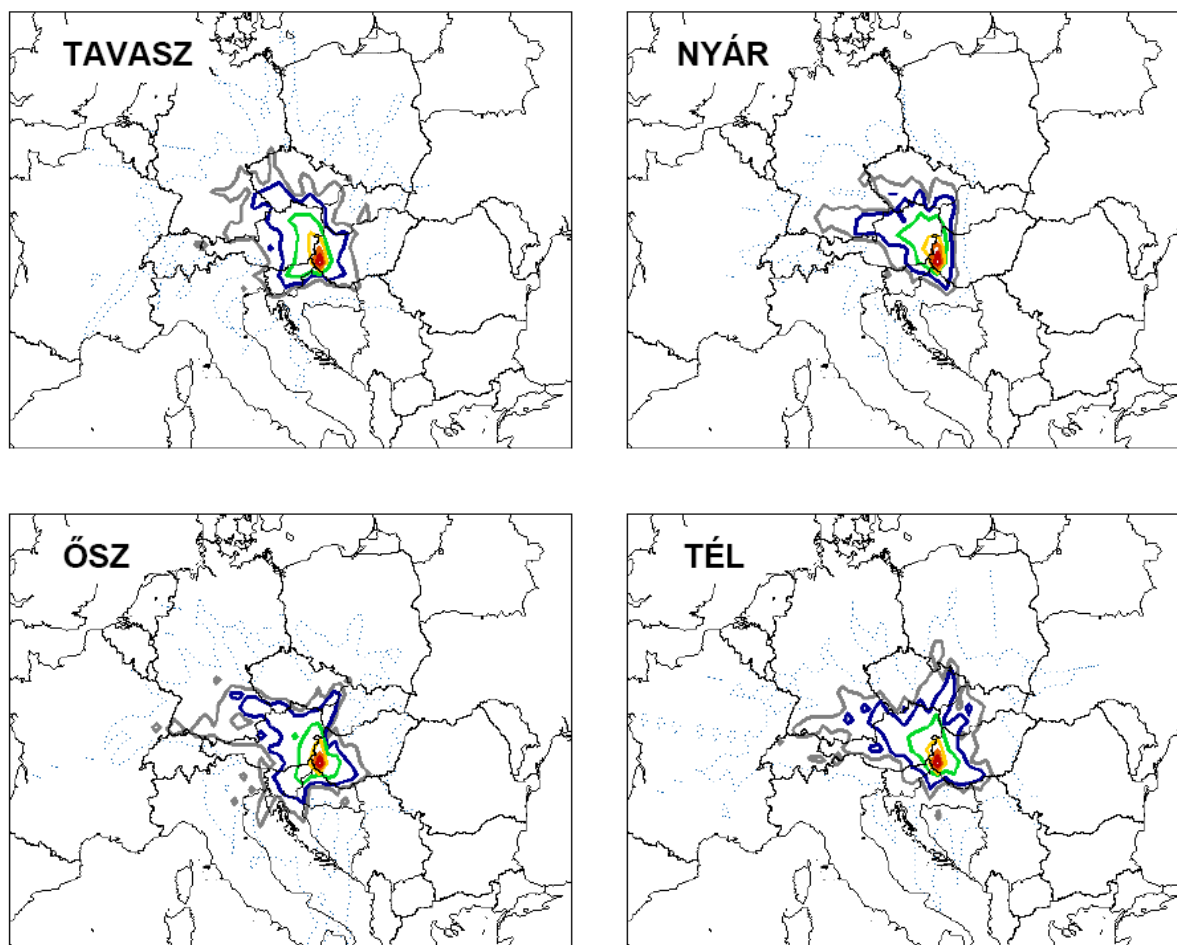
A mérések értékelésekor alapvető kérdés, hogy a kapott adatok mekkora területre reprezentatívak, a kapott eredmények mekkora területre általánosíthatók. Az már korábban is ismert volt, hogy a mérések reprezentativitása erősen függ a napszaktól (Haszpra, 1999), az éjszakai mérések a gyenge légmozgások miatt csak nagyon szűk körzetre tekinthetők érvényesnek. A légköri átkeveredésben erős napi menetet felmutató, alacsony tengerszint feletti magasságban fekvő kontinentális mérőállomásokról (ilyen Hegyhátsál is) csak a koradélutáni órák méréseit használjuk a nagyobb skálájú jelenségek, tendenciák elemzéséhez. Jelen kutatási téma keretében megvizsgáltuk, hogy a széles körben használt koradélutáni mérések mekkora területre tekinthetők érvényesnek.

A területi reprezentativitás meghatározásához megvizsgáltuk, milyen kapcsolat van az állomáson észlelhető koncentráció és az állomás elérő légtömeg pályája mentén elhelyezkedő források/nyelők erőssége között. A vizsgálatok azt mutatták, hogy a forrásokból/nyelőkből származó jel $26,2 \pm 7,6$ óra alatt enyészik e -ad részére. Ezt követően megvizsgáltuk, hogy a különböző évszakokban mekkora és milyen földrajzi elhelyezkedésű területről érkeznek be ennyi idő alatt a légtömegek a mérőállomásra. Az eredmény az 1. ábrán látható.

Az, hogy milyen variancia-járlékot adó területet tekintünk még hatásterületnek a területi reprezentativitás meghatározásakor, meglehetősen szubjektív. Amennyiben a 2,5%-os járulékot tekintjük határnak, akkor az állomás hatásterülete, amelyre a mérések reprezentatívnak tekinthetők, évszaktól függően 180-280 ezer km^2 . A későbbiekben látni fogjuk, hogy a hosszabb időszakok átlagát tekintve (pl. évi átlag), az antropogén források közelsége, a bioszféra által keltett jelentős ingadozás ellenére, az állomás gyakorlatilag globális reprezentativitásúnak tekinthető.

3.2. A felszín-légkör szén-dioxid áram mérések területi reprezentativitása

A függőleges szén-dioxid áram mérések alapvetően különböznek az egyszerű koncentráció mérésektől, hiszen a módszer az igen rövid időskálájú, a légköri örvények által keltett koncentráció-fluktuáció mérésén alapszik. Ennek következtében a mérések területi reprezentativitásának meghatározása is más módszert igényel. A szakirodalomban fellelhető

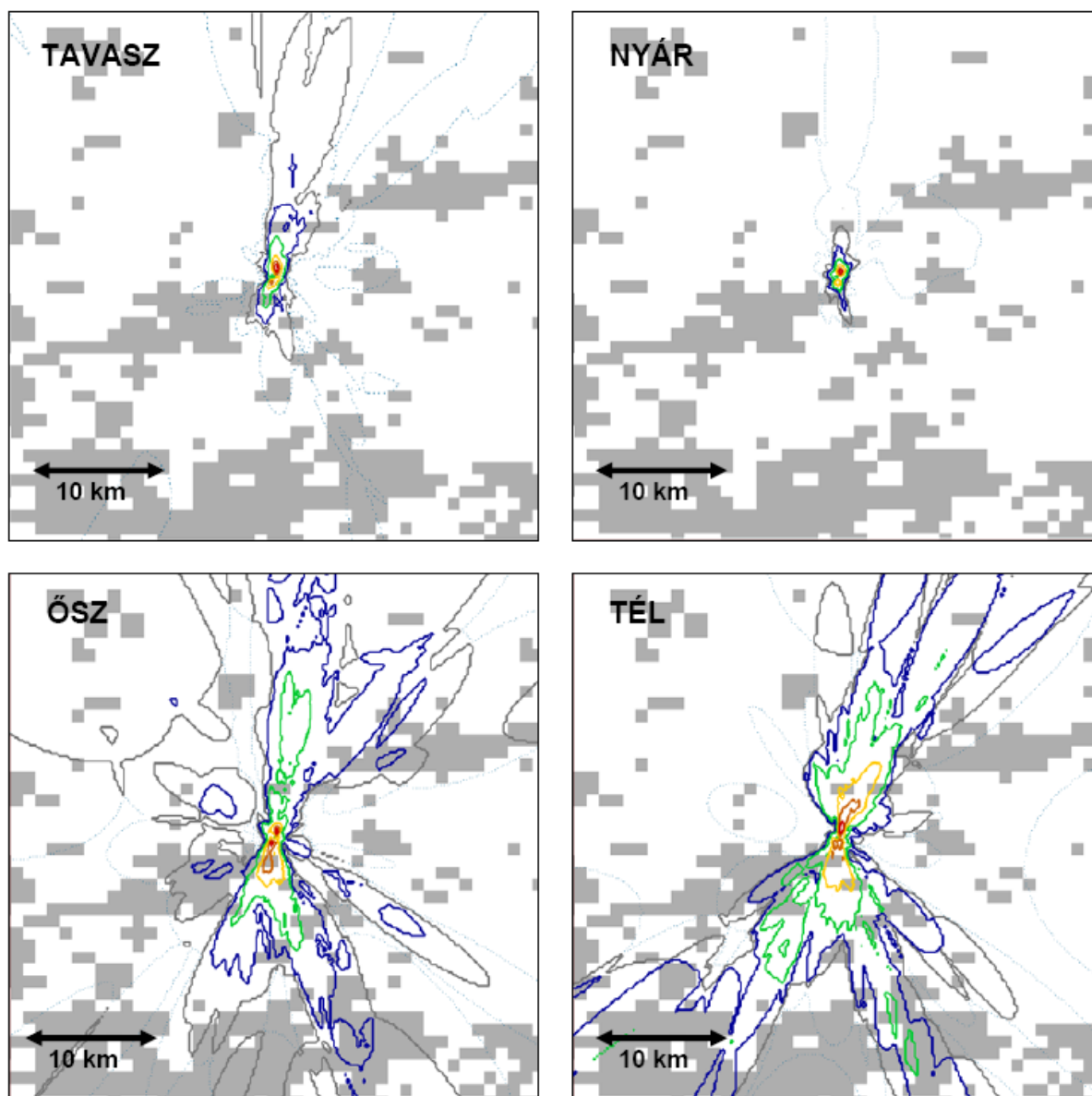


1. ábra: A hegyhátsági nappali szén-dioxid koncentráció mérések hatásterületei a különböző évszakokban 2002. évi meteorológiai adatok alapján. Az izovonalak azt a területet övezik, amelyen belül lévő rácspontokról a maximális variancia-járulék 75 (piros), 50 (narancssárga), 25 (sárga), 10 (zöld), 5 (kék), 2,5 (szürke), illetve 1 százalékánál (pontosított kék) nagyobb járulék származik

számos módszer közül a turbulens transzport egyenlet analitikus megoldásán alapuló FSAM modellt (Schmid, 1994; 1997) választottuk.

A 2. ábra a 82 m-es szinten elhelyezett eddy-kovariancia rendszer nappali órákban érvényes forrásterületét mutatja be évszakonként. Az 1. ábrához hasonlóan az izovonalak itt azokat a területeket övezik, amelyeken belül lévő felszínelemek a fluxus-értékhez való maximális fajlagos (egy rácspontra eső) járulék adott százalékánál nagyobb hozzájárulást adnak. A 2,5%-nál nagyobb járulékot adó, évszaktól erősen függően 8-730 km²-t lefedő forrásterület alakja tükrözi a helyi szélviszonyokat, azt, hogy az áramlás az esetek túlnyomó részében északról vagy délről éri a mérőállomást. A téli időszak kevésbé konvektív viszonyai között a forrásterület lényegesen kiterjedtebb, mint nyáron, amikor a nappali órákban a légkör többnyire labilis rétegződést mutat. Ez az adatok értelmezésében bizonytalanságot okozhat.

A forrásterület különböző ökológiai rendszereket (erdők, legelők, egyéb mezőgazdasági területek), utakat, településeket is lefed. Bár rövid időszakokra nézve ezek aránya az aktuális forrásterületen belül erősen különböző lehet, hosszabb időszak alatt forrásterületen belüli arányuk közelíti a tágabb környezet átlagos viszonyait. Ezért azt mondhatjuk, hogy bár a hegyhátsági tornyon végzett mérések közvetlenül csak egy szűkebb

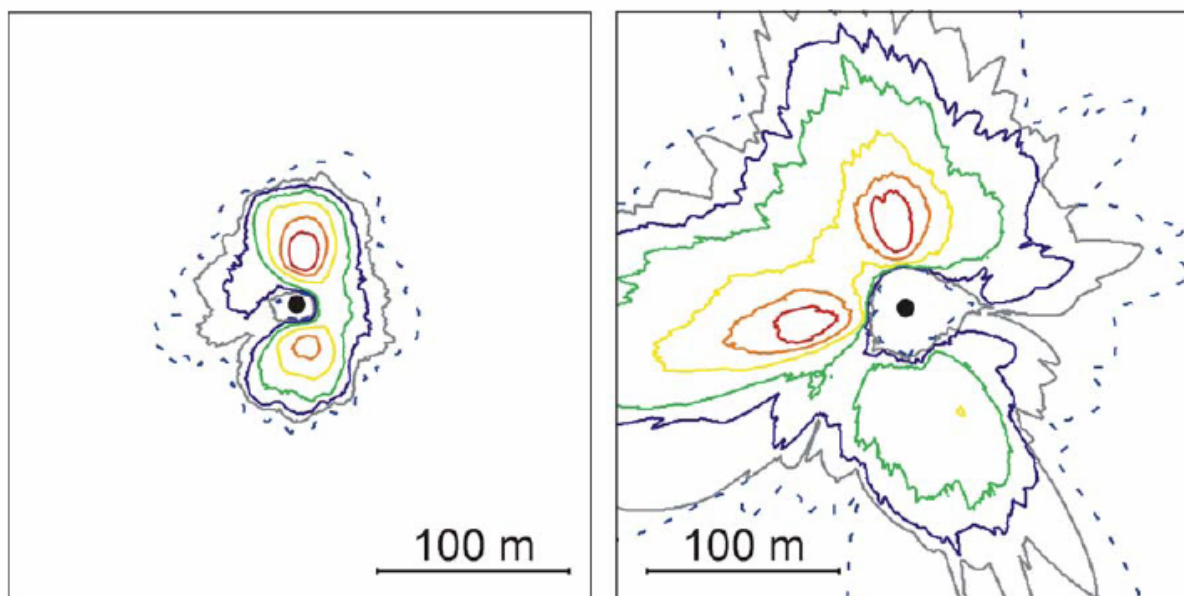


2. ábra: A 82 m-en elhelyezett eddy-kovariancia mérőrendszer nappali forrásterülete évszakonként. Az izovonalak azt a területet övezik, amelyen belül lévő rácspontokról a maximális fluxus-járulék 75 (piros), 50 (narancssárga), 25 (sárga), 10 (zöld), 5 (kék), 2,5 (szürke), illetve 1 százalékánál (pontosított kék) nagyobb járulék származik. A szürke területek az erdőket jelzik

területre reprezentatívak, a mérésekből levont következtetések nagyjából egy 10 km-es körzetre érvényesek. Mivel a tágabb környék éghajlati, vegetációs és talajviszonyai nagyon hasonlóak a mérőhely környezetéhez, ezért viszonylag kis kockázattal állíthatjuk, hogy a mérések elfogadhatóan becslik Hegyhátsál több 100 km²-es környezetének szén-dioxid forgalmi viszonyait is.

A 2. ábrán bemutatott forrásterületek* a nappali órákra vonatkoznak. Az éjszakai órákban a mérőrendszer gyakran a légköri határréteg fölé kerül, így a forrásterület

* A függőleges anyagáram-méréseket befolyásoló terület elnevezésére hatásterület helyett a forrásterület elnevezés a szokásos. A kifejezés az észlelt anyagáram forrásterületére utal, nem a nyomanyagára!



3. ábra: A hegyhátsági gyepek szén-dioxid forgalmát mérő eddy-kovariancia rendszer forrásterülete nappal (balra) és éjszaka (jobbra) a nyári hónapokban (június-augusztus). Az izovonalak azt a területet övezik, amelyen belül lévő rácspontokról a maximális fluxus-járulék 75 (piros), 50 (narancssárga), 25 (sárga), 10 (zöld), 5 (kék), 2,5 (szürke), illetve 1 százalékánál (pontosított kék) nagyobb járulék származik

meghatározása nehézségekbe ütközik, mivel a szén-dioxid áram mérés szempontjából aktív felszín ekkor a határréteg teteje, nem pedig a tényleges földfelszín. Az árammérés ilyenkor is megbízhatóan elvégezhető, de ekkor az áram a határréteg tetejét átlépő anyagáramból és a határrétegen belüli felhalmozódásból tevődik össze.

A kvázi-természetes gyepek szén-dioxid forgalmát mérő eddy-kovariancia rendszerénél a határréteg probléma nem lép fel, mivel mindössze 3 m-es felszín feletti magasságban van, azaz éjjel-nappal a határrétegen belül helyezkedik el. A nyári időszakra vonatkozó éjszakai és nappali forrásterület a 3. ábrán látható. Mivel a gyepek terület viszonylag kicsi, így fontos, hogy a forrásterület is kicsi legyen, a gyepek területen belül maradjon. Ez indokolja a mérőrendszer kis magasságban való elhelyezését.

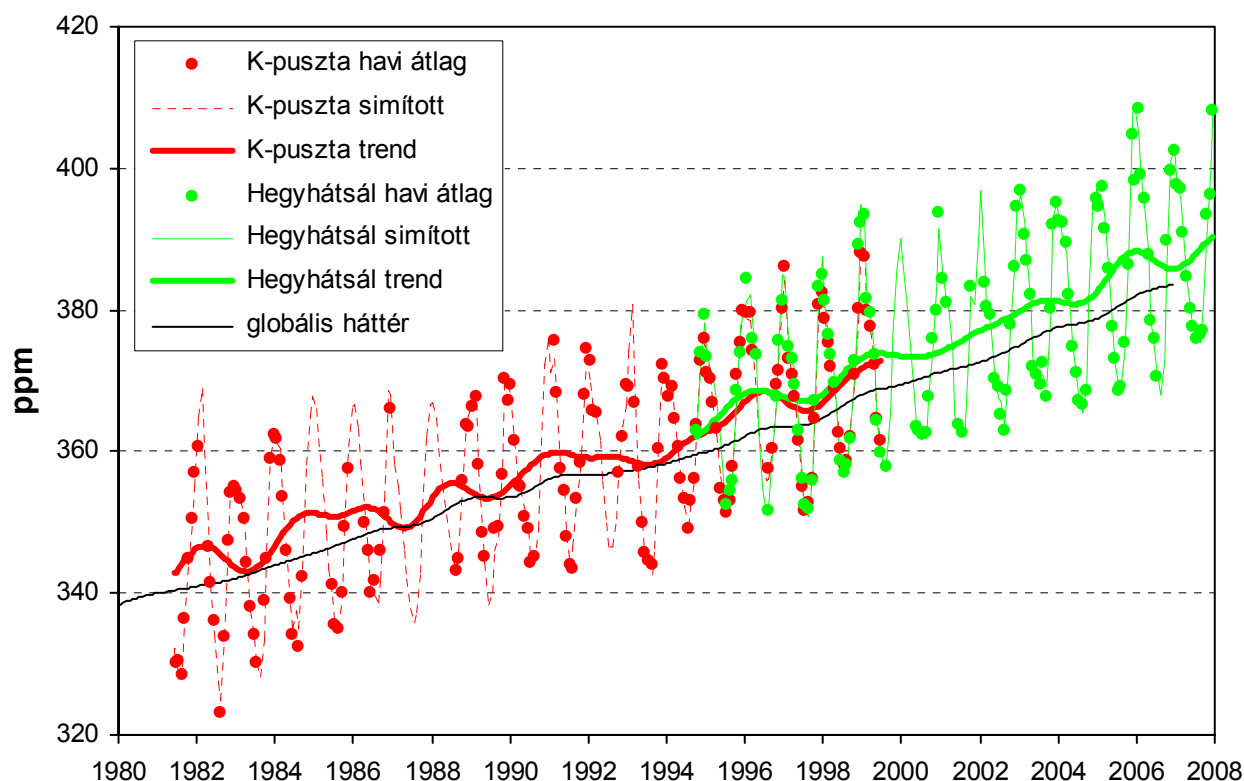
3.3. Nem-CO₂ üvegházgázok mérésének területi reprezentativitása

Az eseti, pillanatszerű levegőminta-vételekből a mérések területi reprezentativitása – jelenlegi ismereteink szerint – nem becsülhető. Az in-situ mérések adatsora egyelőre túl rövid ahhoz, hogy a szén-dioxid méréseknél alkalmazotthoz hasonló vizsgálatokat végezzünk. Ezért a nem-CO₂ üvegházgázok koncentráció-mérésének területi reprezentativitásáról nem tudunk információt adni, de – éppen a vázolt módszertani okok miatt – ezen mérések területi reprezentativitásának meghatározása nem is volt része a kutatási téma munkatervének.

3.4. A szén-dioxid koncentráció mérések eredményeinek elemzése

A hazai szén-dioxid koncentráció mérések (a hegyhátsági mérések mellett bevonva az 1981 és 1999 között végzett K-pusztai méréseket is) elemzéséből három fontos következtetést vontunk le:

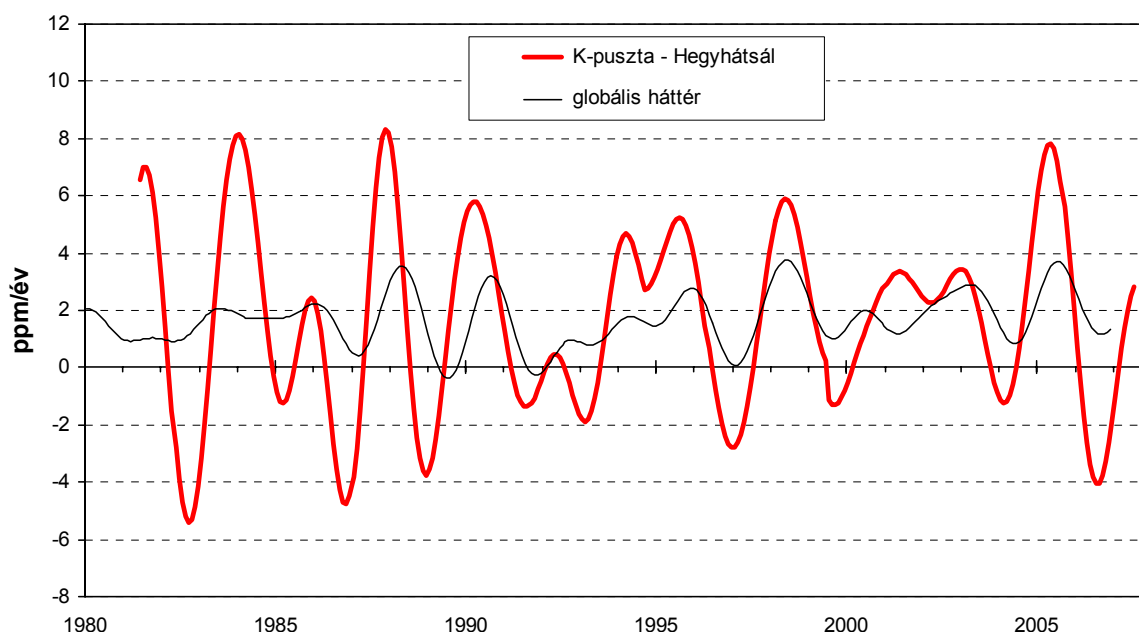
- 1) A magyarországi mérések hűen tükrözik a hosszabb távú globális tendenciákat
- 2) Kimutathatók rövidebb időskálájú sajátosságok
- 3) Kimutatható a regionális éghajlat változásának hatása



4. ábra: A légköri szén-dioxid koncentráció időbeli menete Magyarországon és a globális háttérben

A 4. ábra bemutatja a légköri szén-dioxid koncentráció hosszú távú alakulását a hazai mérések alapján. Az ábra ugyancsak feltünteti a földrajzi szélességünkre vonatkozó globális háttérkoncentrációt, amely együtt fut a hazai mérésekkel. Az átlagos különbség 4,2 ppm, ami az európai antropogén források hatásának tudható be.

A koncentráció növekedési üteme az 1980-as évek elején még csak 1,4 ppm volt évente, míg a legutóbbi öt évre már elérte a 2,1 ppm-et. Ez összhangban van a globális tendenciával. A növekedési ütem azonban nem egyenletes, meglehetősen széles tartományban ingadozik. Az 5. ábrán látható, hogy a hazai mérések által tükrözött ingadozás szinkronban van a globális háttérkoncentrációban megfigyelhető ingadozással, de annál nagyobb mértékű. Ez azt jelzi, hogy a távoli óceáni, sarkvidéki területeken megfigyelhető ingadozásokat a kontinentális területek, nagy valószínűséggel a szárazföldi bioszféra gerjeszti, amelynek szén-dioxid forgalma erősen függ az aktuális időjárási viszonyoktól. A növekedési ütem ingadozása mintegy kilenc hónapos késleltetéssel jól korrelál az El Niño/Déli Oszcillációs



5. ábra: A légkör szén-dioxid koncentráció növekedési ütemének alakulása a hazai mérések szerint és a globális háttérlevegőben

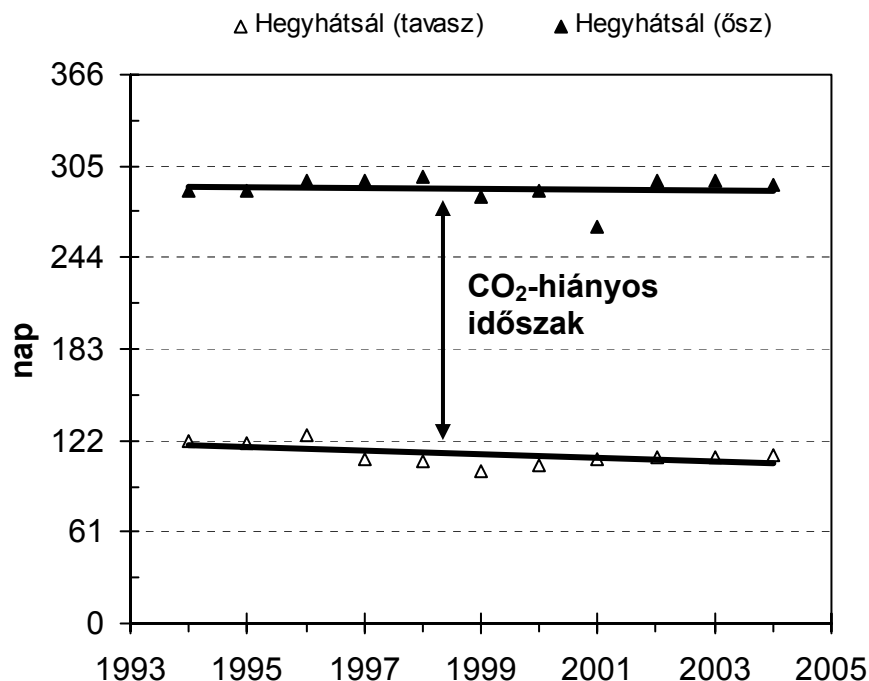
Index alakulásával. Hasonló értéket figyeltek meg több északi félgömbi kontinentális állomáson is.

Összefoglalva megállapítható, hogy a helyi zavaró körülmények (antropogén hatások, bioszféra tevékenysége) ellenére a hazai mérések lehetővé teszik a globális tendenciák kimutatását, sőt jelzik, hogy a globális ingadozások magyarázata a kontinentális területek viselkedésében keresendő.

A légköri szén-dioxid koncentráció évi menetét alapvetően a bioszféra viselkedése alakítja ki. A mérsékelt és magasabb földrajzi szélességeken a vegetációs és nyugalmi időszak ciklikus változása a szén-dioxid koncentrációban is megmutatkozik, tél végi maximumot és nyári minimumot alakítva ki. A nyugalmi időszakban felhalmozódó légköri szén-dioxid mennyiség akkor kezd el csökkenni, amikor a növényzet CO_2 felvétele már meghaladja a talaj-vegetáció rendszer CO_2 kibocsátását. Ez földrajzi szélességünkön jellemzően áprilisban következik be. A hazai mérések szerint azonban a szén-dioxid koncentráció maximuma december-januárban figyelhető meg, ezt követően a koncentráció már csökken. A jelenség modell-számításokkal is igazolt magyarázata az, hogy februártól a légkör függőleges átkeveredése a Kárpát-medencében egyre intenzívebbé válik, és bár a felszín még 2-3 hónapig nettó CO_2 forrás, a szabad troposzférából bekeveredő, szén-dioxiddal kevésbé szennyezett levegő csökkenti a felszíni határreteg CO_2 koncentrációját.

A kutatómunkák döntő része azt vizsgálja, hogy a légköri szén-dioxid koncentráció hogyan befolyásolja az éghajlatot. Az éghajlat és a szén-dioxid koncentráció között azonban kölcsönhatás van, így az éghajlat módosulása kihat a CO_2 koncentráció alakulására is.

A fotoszintézis/respiráció és a légköri átkeveredés intenzitásának napi ciklusa közötti kovariancia jelentős napi menetet alakít ki a légköri CO_2 koncentrációban, különösen nyáron. A respiráció következtében a sekély éjszakai határretegben kialakuló magas koncentráció és az intenzíven átkevert nappali órák koncentrációja közötti különbség (a napi koncentráció-amplitúdó) nyári átlaga eléri a 70 ppm-et. A hegyhátsági mérések szerint azonban ez az amplitúdó az 1994-től 2005-ig tartó vizsgálati időszakban észrevehetően csökkent. A jelenség magyarázata az, hogy ebben az időszakban szignifikánsan csökkent az éjszakai légköri

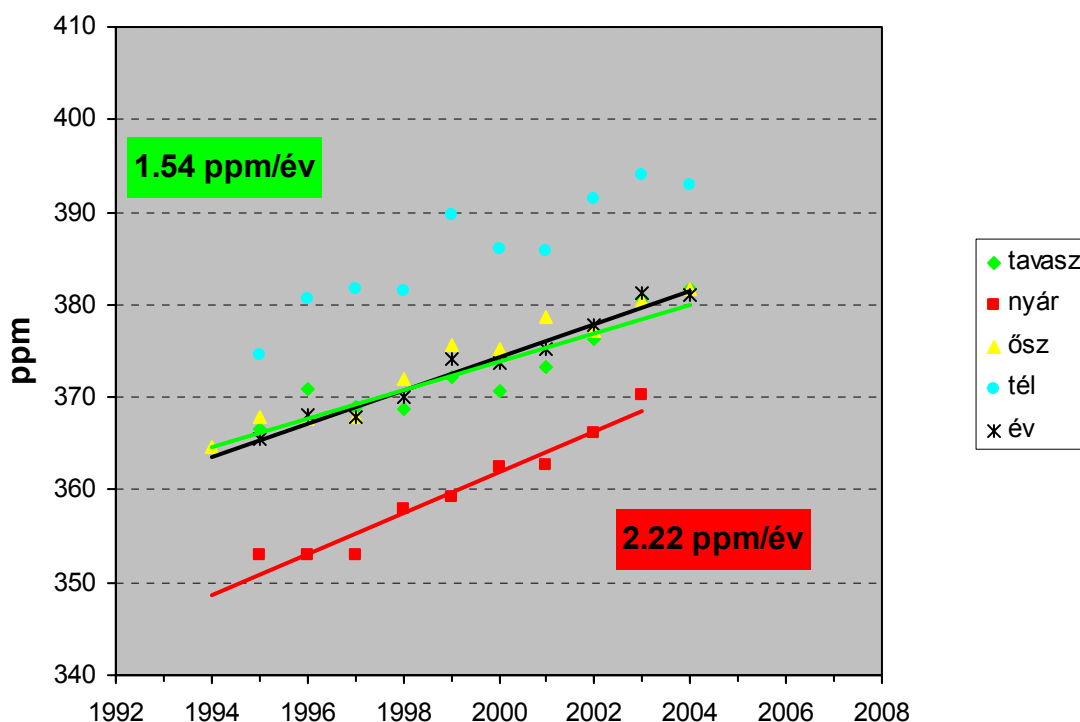


6. ábra: Az évi átlaghoz képest szén-dioxid hiányos és szén-dioxid többletes időszakok közötti tavaszi és őszi váltási időpont alakulása

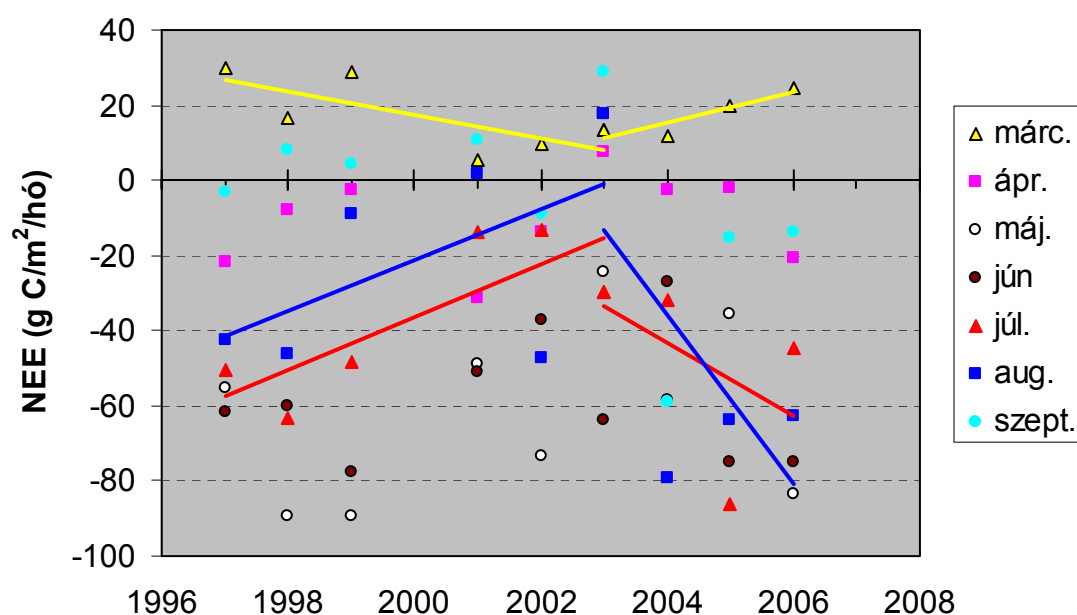
stabilitás (éghajlat-módosulás), így a respirációval kibocsátott szén-dioxid mennyiség egyre nagyobb légtérfogatban oszolva el egyre kisebb koncentrációkat eredményezett. Ezzel csökkent a nappali és éjszakai koncentrációk különbsége, azaz a napi koncentráció-amplitúdó. A légköri stabilitás megfigyelt csökkenését valószínűleg a felhőzet mennyiségének változása, közvetlenül a felszín lehűlésének mérséklődése okozza, ami kihathat az éjszakai áramlások erősségére is, de a kérdés eldöntése még további vizsgálatokat igényel.

A vizsgált időszakban csökkent az évi koncentráció-amplitúdó is. Ennek hátterében az évi koncentrációmenet jellegének változása áll. Az éven belül nőtt a nyári, az éves átlaghoz képest szén-dioxid hiányos időszak hossza, mégpedig oly módon, hogy kezdete egyre előrébb húzódott, miközben végének időpontja lényegében változatlan maradt (6. ábra). A változás közel 1 nap/év. A légköri szén-dioxid koncentráció korábbi lecsökkenése a növényi aktivitás kezdetének korábbra tevődésével, a vegetációs időszak korábbi kezdetével, végső soron az éghajlat változásával van kapcsolatban.

Bár a légköri szén-dioxid koncentráció hazai növekedési üteme megegyezik a globális növekedési ütemmel, a növekedés nem egyformán jelentkezik az egyes évszakokban. Az 1990-es évek közepétől 2003-ig a tavaszi koncentrációk az átlagosnál lassabban, míg a nyáriak az átlagosnál gyorsabban nőttek (7. ábra). Ugyanebben az időszakban megfigyelhető volt a mérőállomás által reprezentált ökológiai rendszerek nyári nettó szén-dioxid felvételének csökkenése is (8. ábra). A koncentráció átlagosnál gyorsabb növekedése a csökkenő bioszférikus szén-dioxid felvételnek volt köszönhető. Ezt az időszakot fokozatosan szárazabbá és melegebbé váló nyarak jellemezték, ami nem kedvezett a növényzet szén-dioxid felvételének, és ez mutatkozott meg a légköri koncentráció alakulásában is. A melegebb időben korábban kezdődő vegetációs időszak viszont megnövelte a tavaszi hónapok növényi szén-dioxid felvételét, így méréselte a koncentráció-növekedés ütemét.



7. ábra: A légköri szén-dioxid koncentráció trendjének alakulása Hegyhátsálon 1994 és 2003 között a különböző évszakokban



8. ábra: A hegyhátsági mérőrendszer által reprezentált ökológiai rendszerek nettó szén-dioxid forgalmának alakulása (negatív előjel = szén-dioxid megkötés) a nyári félévben. Az egyenesek nem statisztikailag szignifikáns trendeket, pusztán a tendenciákat jelzik.

2004-ben véget ért az egyre melegedő és szárazodó időjárással jellemezhető éghajlati anomália. A korábbinál hűvösebb és csapadékosabb, az átlagoshoz közelebb álló

évek következtek, amelyekben a korábbinál nagyobb nyári bioszférikus nettó szén-dioxid felvételt mértünk, és az évszakonkénti trendek eltérése is minimálisra csökkent. A hosszú távú kiegyenlítődést elősegítette, hogy 2004-2006-ban szinte nem emelkedtek a nyári koncentrációk, miközben az éves növekedési ütem 2 ppm körül volt.

A mérések minőségének ellenőrzésére az in-situ mérések eredményeit összevetettük a NOAA által végzett palackos mintavételek analitikai eredményeivel. Az összehasonlítás szerint a két, egymástól független méréssel kapott eredmények eltérése mindössze 0,06 ppm.

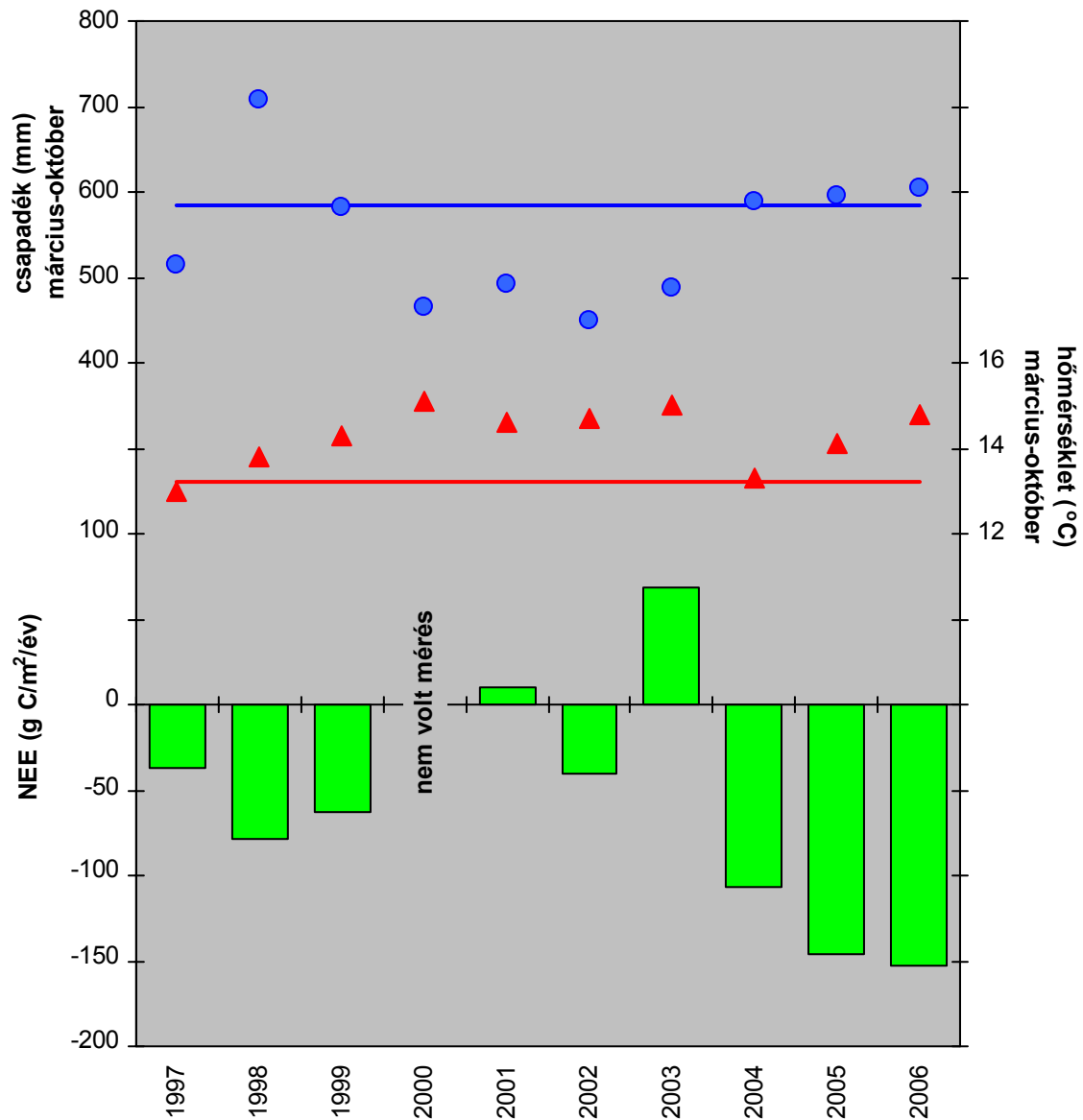
3.5. A felszín és a légkör közötti szén-dioxid forgalom mérések eredményeinek elemzése

A hegyhátsági torony 82 m-es szintjén működő eddy-kovariancia mérőrendszer mérési adatait a 9. ábra foglalja össze. Az ábráról jól látható, hogy a fokozatosan melegedő és szárazodó, 2003-ig tartó időszakban a növényzet nettó szén-dioxid felvétele egyre csökkent. A különösen forró nyarú 2003-ban a természet nettó szén-dioxid forrássá vált. Jelenleg a bioszféra globális léptékben több szén-dioxidot vesz fel, mint amennyit kibocsát. Az emberi tevékenység által kibocsátott CO₂ egy részét is felveszi, így fékezve a légköri szén-dioxid szint növekedését, az üvegházhatás erősödését, a globális éghajlatváltozást. Elméleti megfontolások és laboratóriumi kísérletek azonban azt jelzik, hogy az éghajlat melegedésével a bioszféra nettó szén-dioxid felvétele mérséklődni fog, majd nettó forrássá válhat, ami felgyorsíthatja a globális éghajlatváltozást. Méréseink természetes körülmények között igazolták ezt a jelenséget.

A 82 m magasban elhelyezett mérőrendszer az éjszakai órákban gyakran a felszíni határréteg fölé kerül. Ilyenkor a függőleges anyagáramot a közvetlen mérésekkel nem lehet meghatározni, hiszen a felszínről elinduló anyagmennyiség a mérőrendszer alatti zárórétegnél elakad. A szén-dioxid függőleges koncentráció-profiljának mérésére szolgáló rendszer azonban regisztrálja a záróréteg alatti anyagfelhalmozódást, amiből becsülhető az anyagáramnak az eddy-kovariancia rendszer által nem érzékelhető része. A megbízható eredmények elérése érdekében kiterjedt módszertani munkát végeztünk.

A kvázi-természetes fajösszetételű gyepterület szén-dioxid forgalmának mérése 2006-ban kezdődött meg. Ebben az évben még gyakoriak voltak az adatkimaradások, így éves szén-dioxid mérleget elfogadható pontossággal nem tudunk becsülni. 2007-ben a gyepterület nettó szén-dioxid forgalma $-227,5 \text{ gC/m}^2$ volt, azaz a gyepterület minden négyzetmétere 227,5 g szenet vont ki a légkörből szén-dioxid formájában.

A folyamatos méréseknél különböző műszaki problémák miatt időnként óhatatlanul előfordulnak adatkimaradások. Az éves szén-dioxid forgalom becsléséhez azonban folyamatos adatsorra van szükség. Az adatpótláshoz megvizsgáltuk, milyen kapcsolat van a nettó szén-dioxid forgalom és a fotoszintetikusan aktív besugárzás (nappal), illetve a hőmérséklet (éjjel) között. A kapott összefüggések elegendően szorosak ahhoz, hogy segítségükkel a rövidebb műszerleállások idején a kieső adatokat elfogadható pontossággal pótolni lehessen.



9. ábra: A hegyhátsági mérőállomást övező ökológiai rendszerek nettó éves szén-dioxid forgalmának (net ecosystem exchange – NEE) alakulása (negatív előjel = szén-dioxid felvétel), valamint a március-októberi időszak átlaghőmérséklete és csapadékösszege. A vastag piros, illetve kék vonal az 1960-1990-es időszak átlagát jelzi

3.6. A metán, a dinitrogén-oxid, a kén-hexafluorid mérések eredményeinek értékelése

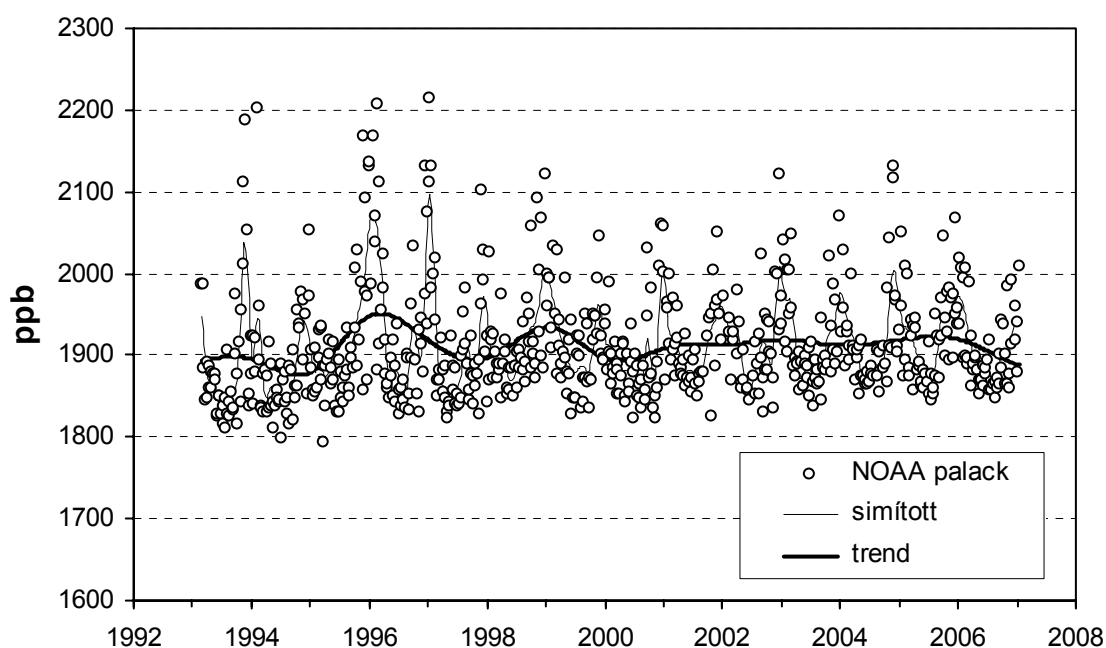
A Hegyhátsálon 2006-ban megkezdett metán, dinitrogén-oxid és kén-hexafluorid méréseket a NOAA által 1993 (CH_4), illetve 1995 (N_2O , SF_6) óta végzett, eseti (heti) mintavételekkel végzett mérésekkel együtt értékeltük. Megállapítottuk, hogy az in-situ és a palackos mintavételeken alapuló mérések jó közelítéssel egyeznek (az eltérés sorrendben 8.27 ppb, 0.59 ppb és 0.07 ppt), az in-situ mérések pontosságát azonban még növelni, zaját csökkenteni kell.

Bár a metán légköri koncentrációja a 18. század óta gyors ütemben nőtt, ez a növekedés az 1990-es évek elejére lelassult, gyakorlatilag megállt. Ezzel összhangban az 1993-ban kezdett magyarországi mérések érdemi növekedést nem is mutatnak (10. ábra). A mért koncentráció értékek átlagosan 70 ppb-val haladják meg a globális háttérkoncentrációt, ami az európai antropogén források hatásának tudható be.

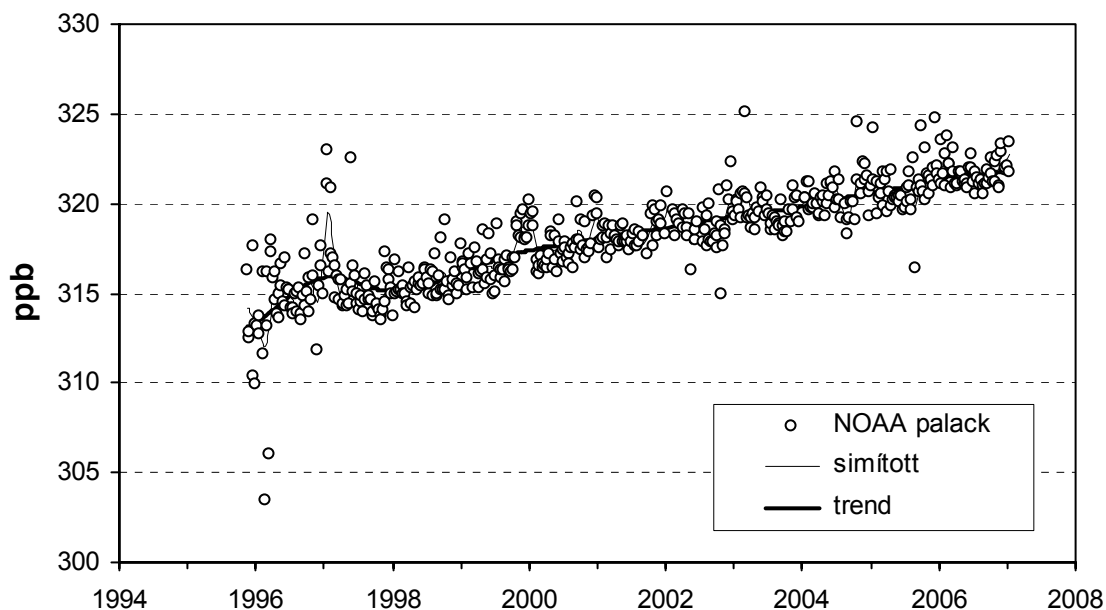
A metán légköri koncentrációja határozott évi menetet mutat, téli maximummal és nyári minimummal, átlagosan 114 ppb-s évi amplitúdóval. Mivel az antropogén források (földgáz-kitermelés és -elosztás, bányászat, állattenyésztés, hulladékkezelés, stb.) kevésbé évszakfüggők, a természetes források pedig Európa középső részén egyrészt kisebb jelentőségűek (mocsarak, ár-ápany terület, rizsföldek), másrészt nyáron a legintenzívebbek, ezért joggal feltételezhető, hogy az évi menetet a légkör függőleges átkeveredésében tapasztalható évi menet határozza meg.

A gázkromatográfiás in-situ mérésekből meghatározott napi menet hajnali maximumot és koradélutáni minimumot mutat, ami ismét csak a légköri átkeveredés meghatározó szerepére utal.

A dinitrogén-oxid koncentrációja csaknem lineáris, 0,79 ppb/év körüli trendet mutat (11. ábra), ami gyakorlatilag megegyezik az óceánok és a sarkvidéki területek felett mért értékkel. Hegyhátsálon átlagosan 1,6 ppb-val mérünk magasabb koncentrációt, mint például a Csendes-óceán közepén, a Mauna Loa Observatóriumban. A különbség az európai antropogén forrásoknak köszönhető. A légkörbe kerülő dinitrogén-oxid jelentős része biogén

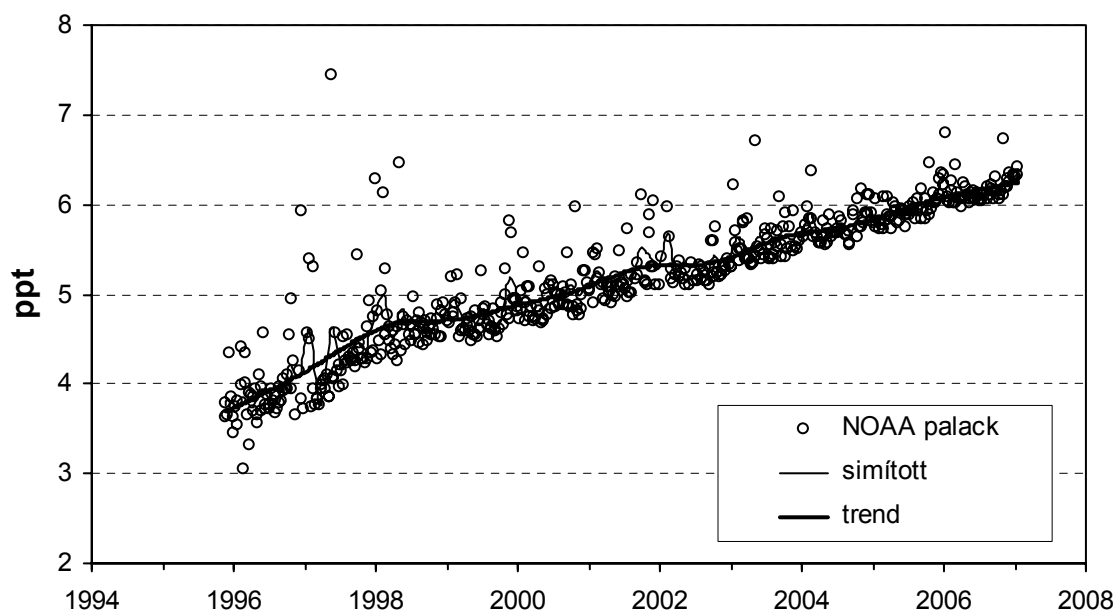


10. ábra: A metán-koncentráció alakulása Hegyhátsálon a NOAA palackos levegő-mintavételei alapján

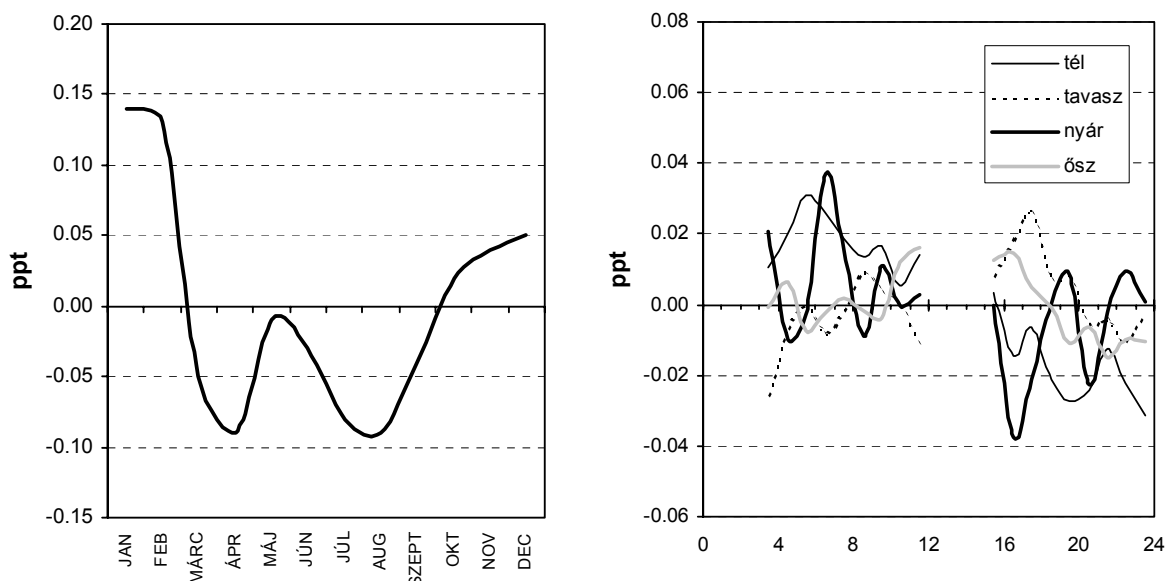


11. ábra: A dinitrogén-oxid koncentráció alakulása Hegyhátsálon a NOAA palackos levegő-mintavételei alapján

forrásból (denitrifikáció) származik, amit az ember a nitrogén-megkötő növények termesztésével, nitrogén-tartalmú műtrágyák alkalmazásával jelentősen növel. A dinitrogén-oxid koncentrációja az átlagkoncentrációhoz képest csekély amplitúdójú (1,4 ppb), de sajátos alakú évi menetet mutat. A fő maximum ennek a nyomanyagnak az esetében is télen alakul ki, de koránnyáron egy kisebb, másodlagos maximum is megfigyelhető. A biológiai aktivitás hőmérsékletfüggő, így stabil légkör mellett téli minimumot és nyári maximumot kellene látnunk. A légkör átkeveredése azonban a nyári hónapokban lényegesen intenzívebb, mint



12. ábra: A kén-hexafluorid koncentráció alakulása Hegyhátsálon a NOAA palackos levegő-mintavételei alapján



13. ábra: A kén-hexafluorid évi menete az évi átlaghoz képest (baloldali ábra) és napi menete a különböző évszakokban a napi átlaghoz képest (jobb oldali ábra). A napközbeni és az éjszakai adathiányt az időigényes kalibrációs folyamat okozza.

télen. A téli maximumot a sekély határrétegben való felhalmozódás, míg a nyári másodlagos maximumot a biogén források intenzív működése okozza. A napi menet amplitúdója is csekély, nyáron sem éri el a 2 ppb-t. Alakja hasonló a metánéhoz, azaz ennek a nyomanyagnak az esetében is a légkör függőleges átkeveredésének napi menete játssza a meghatározó szerepet. A talaj viszonylag csekély napi hőingása miatt a denitrifikációs folyamatok intenzitásának napi menete gyenge, nem befolyásolja észrevehetően a meteorológiai folyamatok által meghatározott koncentráció-menetet.

A rendkívül hosszú légköri tartózkodási idejű (kb. 3200 év) kén-hexafluorid koncentrációja egyenletesen, évi 0,23 ppt-vel növekszik, ami megegyezik a világ más részein végzett mérések eredményeivel. Gyakorlatilag kizárólag antropogén forrásokból származik, így érthető, hogy az erősen iparosított, sűrűn lakott Közép-Európában koncentrációja átlagosan 0,33 ppt-vel magasabb, mint a Csendes-óceán közepén, a Mauna Loa Observatóriumban. Kibocsátása elvileg független az évszaktól, így évi mentét kizárólag a meteorológia alakíthatja. Ennek megfelelően egyetlen, téli maximumot és nyári minimumot mutató hullámot várunk. A mérések azonban egy nem elhanyagolható korányári másodlagos maximumot is mutatnak (13. ábra), ami nem magyarázható mással, csak az áramlási rendszerben lévő esetleges ciklikussággal, ami a nyári időszakban szennyezettebb területek felől szállítja a levegőt, mint a téli félévben. Ezt a hipotézist azonban még ellenőrizni kell.

Ha a hegyhátsági mérőállomás hatásterületén vannak említésre méltó SF₆ források, akkor a napi menetben kora reggeli maximumot és koradélutáni minimumot kell látnunk, hiszen a napi menetet nem mutató forrásintenzitás a sekély éjszakai határrétegben magasabb koncentrációkat alakít ki, mint az intenzív függőleges átkeveredéssel jellemezhető nappali órákban. A kén-hexafluorid esetében azonban nem mutatható ki érdemi napi koncentráció-menet egyik évszakban sem (13. ábra). Ez azt jelenti, hogy az állomás hatásterületén nincs komolyabb antropogén szennyezőforrás, település (a nagyfeszültségű elektromos berendezések, amelyek kapcsolóiból SF₆ szabadulhat fel, erősen kötődnek a településekhez,

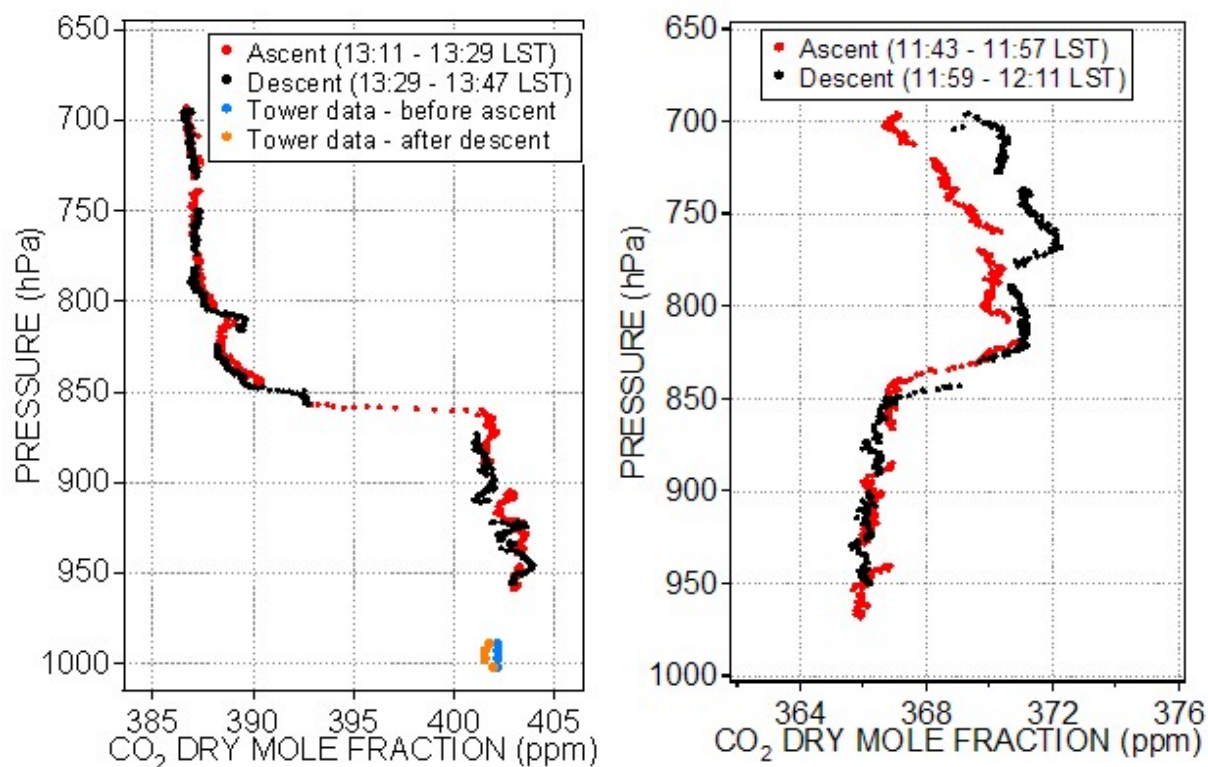
ipari zónákhoz), azaz az állomás valóban regionális háttérlevegőszennyezettség-mérő állomásnak tekinthető, amelynek adatai tágabb környezetére is jellemzőnek tekinthetők.

3.7. Eseti levegőminta-vételek

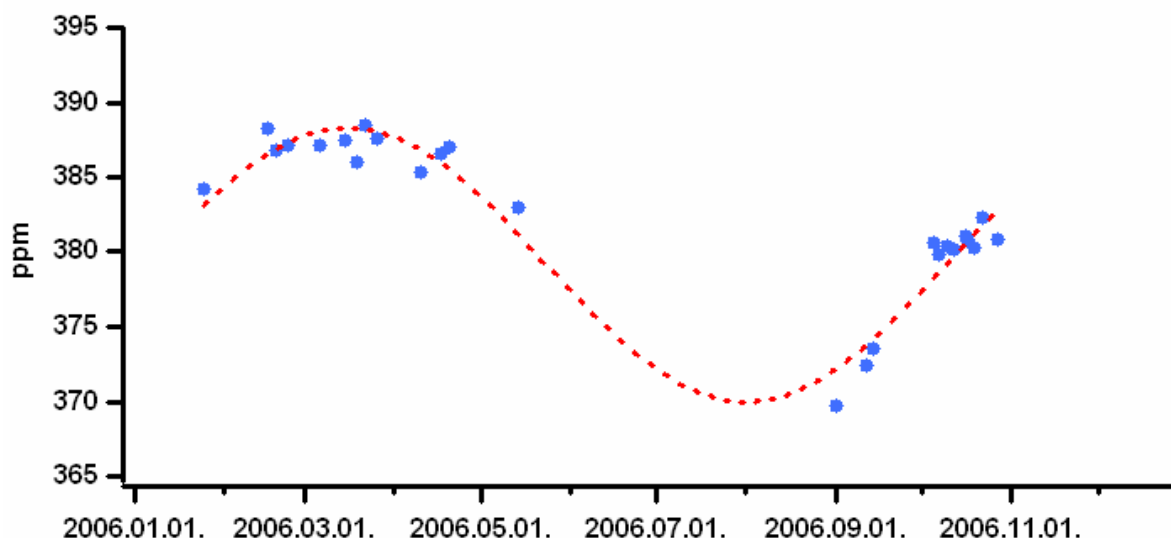
A NOAA levegőmintákból származó metán, dinitrogén-oxid és kén-hexafluorid adatok feldolgozásának eredményeit az előző fejezetben bemutattuk. A CO₂ stabilizotóp-összetétellel kapcsolatos adatok egyelőre csak a modellfejlesztési munkában hasznosulnak (lásd később). A Groningeni Egyetemmel együttműködésben végzett mintavételek száma egyelőre csekély a mélyrehatóbb elemzésekhez. Az mindenesetre látható, hogy a nyári időszakban magas a korreláció a CO₂ koncentráció és az O₂/N₂ arány között (a fotoszintézis-respiráció mérhető mértékben módosítja az O₂/N₂ arányt), és a ¹³C/¹²C arányt is felhasználva becsülhetőnek látszik a bioszférikus és fosszilis hozzájárulás a mért CO₂ koncentrációban. Hazai analitikai kapacitás híján e területen a munka nagymértékben a partner-intézmények aktivitásán múlik.

3.8. Repülőgépes mérések

A hároméves repülőgépes mérési programnak jelenleg még csak a kétharmadánál tartunk, így részletesebb adatfeldolgozásnak még nem volt értelme nekifogni. Az azonban jól látható, hogy a mérések széles körben hasznosulhatnak majd, az üvegházgáz-kutatáson túlmenően a határreteg-vizsgálatokban és a nyomanyag-transzport modellezésben is. A 14. ábra egy téli, a felszíni határretegben történő felhalmozódást jelző, és egy nyári, a bioszféra szén-dioxid felvételét bizonyító koncentráció-profilját mutat be. A 15. ábra a szabad troposzféra alsó részében megfigyelhető szén-dioxid koncentráció időbeli menetét mutatja be.



14. ábra: A szén-dioxid függőleges koncentráció-profilja a bioszféra inaktív (baloldali ábra, 2006. március 15.) és aktív (jobboldali ábra, 2006. szeptember 1.) időszakában



15. ábra: A szén-dioxid koncentráció alakulása a szabad troposzféra alsó részében a Hegyhátsál felett végzett repülőgépes mérések alapján

4. MODELLEZÉSI TEVÉKENYSÉG

4.1. Forrásterület modell

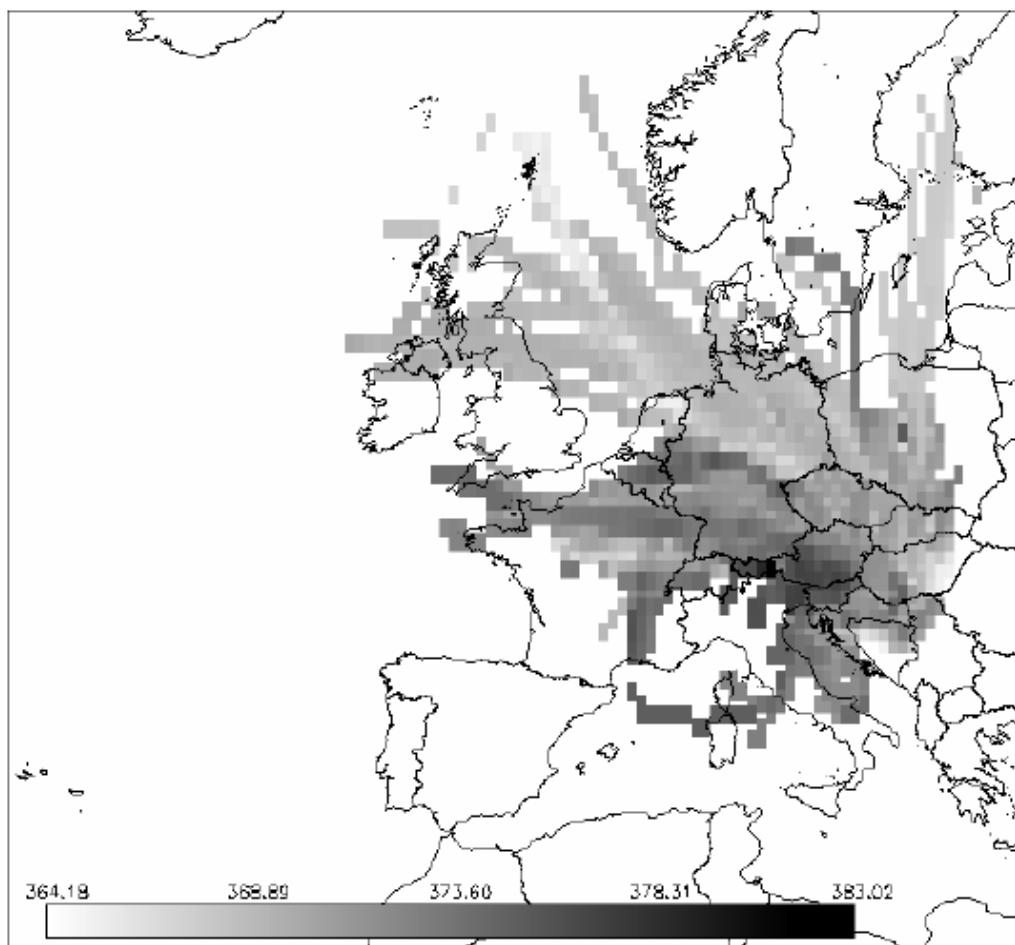
A munkatervben szereplő forrásterület modell kifejlesztésének célja a felszín és a légkör közötti szén-dioxid csere, a függőleges CO₂ anyagáram mérések területei reprezentativitásának meghatározása volt. Erre a célra Schmid (1994; 1997) „Flux Source Area Model”-jét adaptáltuk. A modellel végzett számításokon alapulnak a 3.2. fejezetben bemutatott forrásterület számítások.

4.2. CO₂ források/nyelők területi elhelyezkedésének meghatározása (CO₂-térkép)

A szén-dioxid koncentráció mérések területi reprezentativitásának becsléséhez használt légpálya (trajektória) számítások (3.1. fejezet) lehetőséget adtak annak megvizsgálására is, hogy az állomás hatásterületén milyen a CO₂ források/nyelők területi elhelyezkedése. Ehhez a trajektória-számításokat összekapcsoltuk a hegyhátsáli mérőtorony 115 méteres szintjén kora délután mért szén-dioxid koncentráció értékekkel. A mért értéket hozzárendeljük a trajektória által érintett területekhez. Nagyszámú trajektória figyelembevételével kirajzolódik, hogy mely területekről kapunk magasabb és mely területekről alacsonyabb szén-dioxid tartalmú légtömegeket. Az eredmény térképen ábrázolható (CO₂-térkép) (16. ábra).

4.3. Box-modell a felszín-légkör kicserélődés leírására

A felszíni határrétegben kialakuló koncentráció és anyagáram viszonyok leírására kifejlesztett box-modellt kétféle változatban is kidolgoztuk. Az első változat a határréteg-vastagság alakulásából és a határréteg tetején észlelhető függőleges szélességből (meteorológiai modellekből rendelkezésre álló adatok), továbbá a légköri CO₂ koncentráció

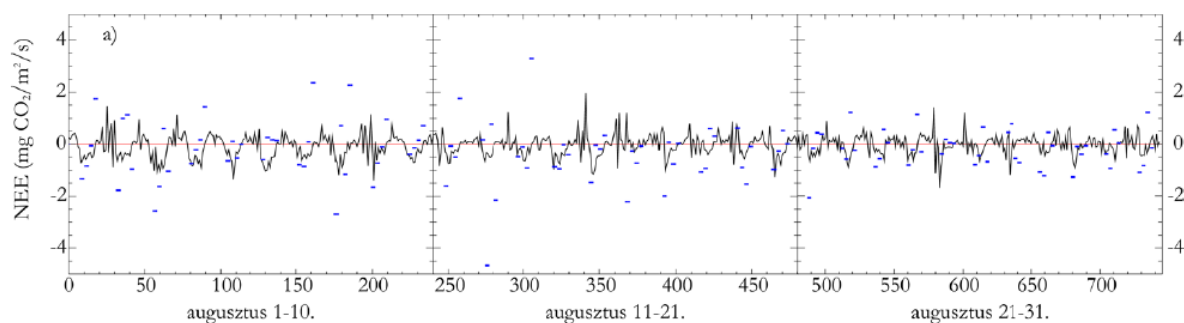


16. ábra: 2003 nyarának CO₂ térképe az ECMWF adatbázis és a HYSPLIT modell felhasználásával [ppm]

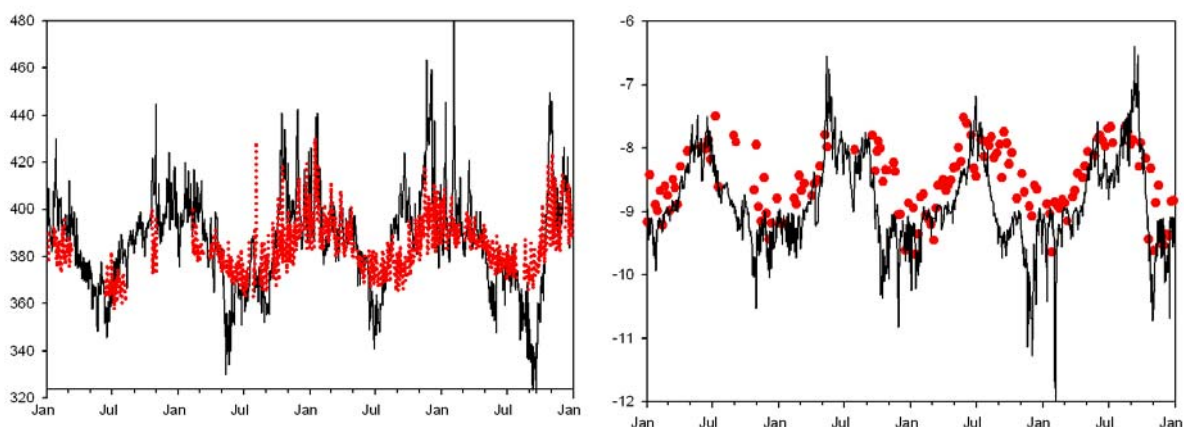
alakulásából becsli a felszín szén-dioxid kibocsátását, illetve felvételét. A 17. ábra az 1998 augusztusára vonatkozó eredményeket mutatja. A ténylegesen mért átlagos nettó szén-dioxid csere ($-0,283 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) és a számított ($-0,270 \text{ mg CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) a teszt-időszakra vonatkozóan jól egyezett, bár a számított adatok szórása nagyobb volt, mint a mértké. Ugyanakkor egy ilyen egyszerű, a légköri advekciót teljesen figyelmen kívül hagyó modellől ennél jobb eredménye nem is várható. Célja az, hogy azokra a helyekre is hozzávetőleges CO₂ forgalom becslést adhassunk, ahol ilyen mérések egyáltalán nincsenek, csupán CO₂ koncentráció adatok állnak rendelkezésre.

A másik modellváltozatban a határréteg-vastagságra vonatkozó adatok mellett a felszín-légkör szén-dioxid cserére vonatkozó adatokat használtuk fel annak érdekében, hogy a szén-dioxid légköri koncentrációját, illetve stabilizotóp-összetételét becsüljük. Ezt a modellt használtuk fel annak bizonyítására, hogy a légkör függőleges átkeveredésének tél végi, tavaszi gyors változása okozza a szén-dioxid koncentráció januártól megfigyelhető csökkenését, ami a felszíni forrásokkal/nyelőkkel egyébként nem lenne megmagyarázható (lásd 3.4. fejezet, 10. oldal).

A modell továbbfejlesztett változatával hosszabb, 4 éves időszak (2001-2004) viszonyait vizsgáltuk. A 18. ábrán a modellezett és mért szén-dioxid koncentráció, illetve szén stabilizotóp-összetétel látható. Ebben az esetben is azt látjuk, hogy a modell jó közelítéssel leírja a folyamatokat, ugyanakkor a számított értékek szórása meghaladja a mért értékekét. Ez természetes következménye a modellben alkalmazott egyszerűsítéseknek, elsősorban az



17. ábra: A mért (fekete vonal) és a határréteg-mérleg modellel, háromórás átlagolási idővel számított (kék pontok) felszín-légkör nettó szén-dioxid csere Hegyhátsálon, 1998 augusztusában. Az x-tengelyen az 1998. augusztus 1. 0 órától eltelt idő szerepel órákban megadva

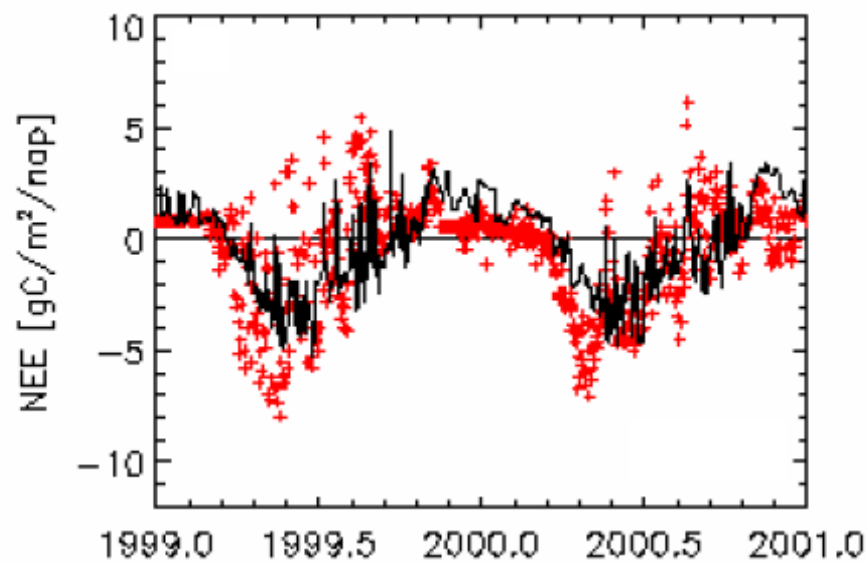


18. ábra: Baloldalon a mért (piros vonal) és modellezett (fekete vonal) szén-dioxid koncentráció (ppm), jobboldalon a mért (piros pontok) és modellezett $\delta^{13}\text{C}$ koncentráció (‰) a 2001-2004-es időszakra

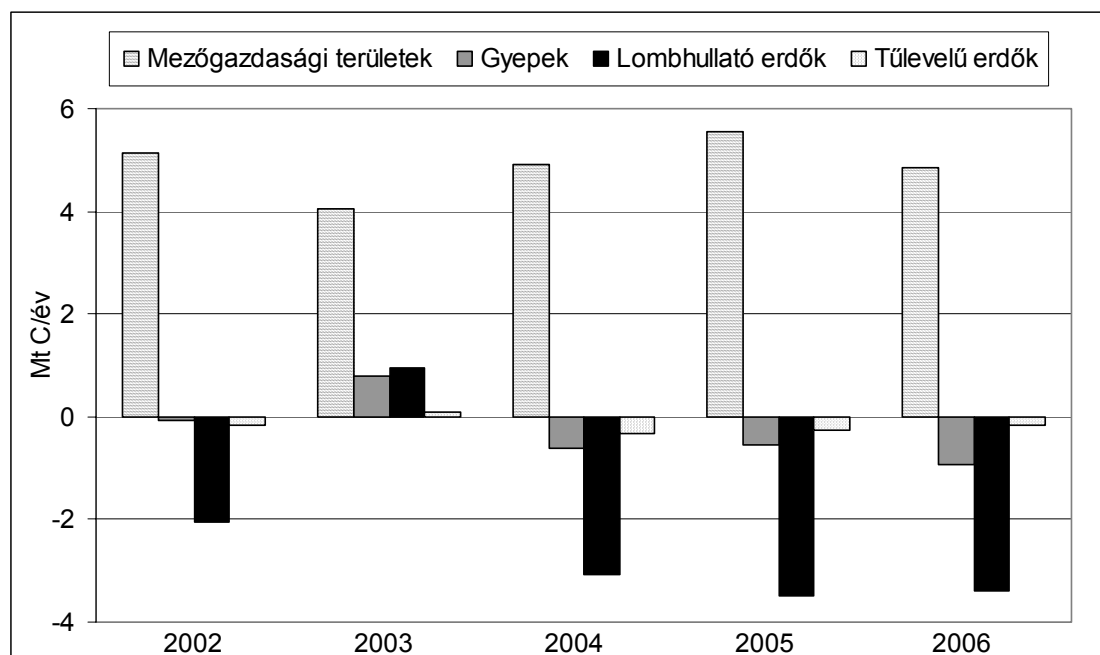
advektációs folyamatok elhanyagolásának. A horizontális anyagtranszport csak lényegesen bonyolultabb, sokkal nagyobb bemenőadat-igényű, két- vagy 3-dimenziós modellekkel lenne figyelembe vehető.

4.4. A Biome-BGC modell

A fenti, egyszerű modellekkel a környezeti paraméterek változásának hatása, az éghajlatváltozás hatása nem vehető figyelembe. Ehhez a talajban, a növényekben zajló folyamatokat leíró, folyamatorientált ökológiai rendszer modell szükséges. A környezeti viszonyok és a bioszféra-légkör szén-dioxid forgalom vizsgálatára a nyilvánosan hozzáférhető Biome-BGC modellt választottuk. Komoly módszertani feladatot jelentett a modell hazai viszonyokra való adaptálása, a modell kalibrálása, majd validálása, amelyhez a Hegyhátsálon végzett bioszféra-légkör szén-dioxid csere méréseket használtuk fel (19. ábra). Ezzel a módszerrel gyepes és mezőgazdasági területekre vonatkozóan behangoltuk a modellt.



19. ábra: A nettó felszín-légkör szén-dioxid csere a hegyhátsági mérések (fekete vonal) és a modellszámítások szerint (piros +)



20. ábra: Az egyes felszínborítottsági kategóriák becsült nettó szén-dioxid cseréje Magyarország teljes területére vonatkozóan, 2002 és 2006 között, Mt C/év mértékegységben kifejezve. A negatív előjel szén-dioxid felvételt, míg a pozitív előjel szén-dioxid kibocsátást jelent a légkör felé.

Magyarország egy részét azonban erdők borítják, amelyek szén-dioxid cseréjére egyelőre nem állnak rendelkezésre hazai mérések. A Biome-BGC modell erdőkre vonatkozó változatát ezért csak irodalmi adatok alapján tudtuk parametrizálni. Így vált lehetővé, hogy a modell segítségével megbecsülhessük az egész ország teljes bioszférikus szén-dioxid mérlegét. (20. ábra). A számítások szerint (ahogy ezt a közvetlen mérések is jelezték – lásd

3.5. fejezet) az ökológiai rendszerek rendkívül érzékenyen reagálnak az éghajlat ingadozásaira. A mezőgazdasági területektől/növényzettől eltekintve, a magyarországi ökológiai rendszerek jelenleg alapvetően nettó szén-dioxid felvevők. A mezőgazdasági területek jelentős nettó szén-dioxid kibocsátása azonban az országos bioszférikus mérleget pozitívba fordítja, azaz az ipari/fosszilis kibocsátás mellett az emberi beavatkozás miatt biológiai forrással is számolnunk kell.

5. PUBLIKÁCIÓS TEVÉKENYSÉG

A Magyarországon folyó, üvegházhatású gázokkal kapcsolatos mérési és kutatási programokról rendszeresen beszámoltunk a Meteorológiai Világszervezet kétévente megrendezésre kerülő szakértői ülésén (Haszpra et al., 2005c; Haszpra and Barcza, 2006) és a négyévente sorra kerülő Nemzetközi CO₂ Konferencián (Haszpra et al., 2005b). A Meteorológiai Világszervezet mérési programjába illeszkedő adatokat (CO₂, meteorológiai adatok) megküldtük a nemzetközi adatközpontnak (WDCGG). A CarboEurope projekt által támogatott mérések (valamennyi bemutatott mérés) adatait a meghatározott rend szerint jelentettük a CarboEurope adatbázisnak. A témakör kutatói mindkét helyről hozzáférhetnek a munkájukhoz szükséges adatokhoz.

A felszín és a légkör közötti szén-dioxid áram mérésével kapcsolatos módszertani kutatásaink (2.3. fejezet) eredményeit az Agricultural and Forest Meteorology című folyóiratban tettük közzé (Haszpra et al., 2005a).

A mérések területi reprezentativitásának meghatározásával kapcsolatos munkánk (3.1. és 3.2. fejezet) részletei megjelentek a 8. IGAC konferencián (Haszpra et al., 2004), és a 2005. évi AsiaFlux konferencián (Barcza et al., 2005). A CO₂ források/nyelők területi elhelyezkedésének meghatározási módszerét (4.2. fejezet) az Európai Geofizikai Unió 2006. évi Közgyűlésén (Szabó et al., 2006) mutattuk be.

A szén-dioxid koncentráció mérésekből levonható nagyszámú következtetés (3.4. fejezet) döntő része a témavezető 2006-ban sikeresen megvédett akadémiai doktori értekezésében (Haszpra, 2005) jelent meg először. A hosszabb adatsoron megismételt elemzések egy részét 2008 elején nyújtottuk be publikálásra (Haszpra et al., 2008), a további részletek publikálására pedig szintén még 2008-ban sor kerül.

A nem-CO₂ üvegházhatású gázok mérését (2.4. fejezet), a hasonló mérési programot végző állomásokkal együtt, a CarboEurope 2006. évi konferenciáján mutattuk be (Vermeulen et al., 2006). Az első mérési eredményeket (3.6. fejezet) 2008 elején nyújtottuk be publikálásra (Haszpra et al., 2008).

A repülőgépes mérési programot (2.6. fejezet), a partnerintézményekkel együtt, a 7. Nemzetközi CO₂ Konferencián ismertettük először (Ramonet et al., 2005). Részletesebb, adatértékelést is tartalmazó publikáció(k) a program befejezését követően, 2009-ben várhatók.

Az eseti mintavételek már feldolgozott adatait holland partnerünkkel együtt ugyancsak a 7. Nemzetközi CO₂ Konferencián mutattuk be (Sirignano et al., 2005).

A bioszféra és a légkör közötti szén-dioxid csere mérés eredményei (3.5. fejezet) a már említett, elsősorban módszertani tanulmányon kívül (Haszpra et al., 2005a), további fórumokon is bemutatásra kerültek. Szerepeltek a 2006. évi Nemzetközi Regionális Szén-mérleg Konferencián (Haszpra et al., 2006), továbbá 2007-ben bekerültek egy európai összefoglaló munkába is (Gilmanov et al., 2007). A bővülő mérési adatsor alapján készült elemzés megjelenés alatt áll (Barcza et al., 2008a).

A határréteg-mérleg modell (box-modell, 4.3. fejezet) különböző fejlesztési stádiumai megjelentek az Európai Geofizikai Unió 2005. és 2006. évi Közgyűlésén (Tarczay et al.,

2005; 2006). Továbbfejlesztett változatának publikálás előkészítés alatt áll, és várhatóan hamarosan benyújtjuk a Photosynthetica című folyóiratnak (Hidy et al., 2008).

A Biome-BGC modell fejlesztésének egyes lépései az Európai Geofizikai Unió 2006. évi Közgyűlésén (Hidy et al., 2006b) és a Cereal Research Communication című folyóiratban (Hidy et al., 2007) jelentek meg. A gyepekre vonatkozó első számításokat a Léggör című hazai folyóiratban (Hidy et al., 2006a), míg a modell segítségével végzett országos bioszférikus CO₂ kibocsátás-beclést a „Klima-21” Füzetekben jelentettük meg (Barcza et al., 2008b). Bővített, angol nyelvű változatát 2008. I. negyedévében az Időjárás című folyóiratnak nyújtjuk be (Barcza et al., 2008c).

Az éghajlatváltozás és hatásainak kutatása számtalan tudományterületet érint. Ezért komoly súlyt fektettünk arra, hogy legfontosabb eredményeink közérthető formában a szélesebb hazai szakmai közönséghez is eljussanak. Ennek szellemében készültek az „AGRO-21” Füzetekben (Haszpra és Barcza, 2005a), a Magyar Tudományban (Haszpra és Barcza, 2005b) és a Léggörben (Haszpra, 2007) megjelent publikációk, továbbá a 2005. évi Meteorológiai Tudományos Napokon bemutatott anyag (Haszpra et al., 2006a).

A kutatási téma során gyűjtött adatok teljes körű feldolgozása nem fejeződhetett be a téma formális befejezéséig. Ez a munka folytatódik, így a következő egy-két évben, a jelen OTKA kutatási témára hivatkozva, még további publikációk is várhatók.

6. IRODALOMJEGYZÉK

- Barcza, Z., Haszpra, L., Hidy, D., Iványi, Zs., Kern, A., Kondo, H., Saigusa, N., Szabó, T., Tarczay, K. and Yamamoto, S., 2005. Carbon dioxide exchange monitoring and research programs at the Hungarian tall tower site. In: Proceedings, AsiaFlux Workshop 2005. International Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation, Fujiyoshida, Japan, 24-26 August, 2005. (eds.: Workshop Organizing Committee). P46, pp. 88. Tsukuba, Japan, 2005.
- Barcza Z., Haszpra L., Hidy D., 2008a: A felszín-légkör szénforgalom mérése mikrometeorológiai módszerrel. In: 32. Meteorológiai Tudományos Napok, 2006 - Felhőfizika és mikrometeorológia (Szerk.: Weidinger T.). Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, (nyomdában)
- Barcza, Z., Haszpra, L., Hidy, D., Churkina, G., Horváth, L., 2008b: Magyarország bioszférikus szén-dioxid mérlegének becslése a Biome-BGC modellel. „Klima-21” Füzetek (nyomdában)
- Barcza, Z., Haszpra, L., Somogyi, Z., Hidy, D., Churkina, G., Horváth, L., 2008c: Estimation of the biospheric carbon dioxide budget of Hungary using the Biome-BGC model. Magyarország bioszférikus szén-dioxid mérlegének becslése a Biome-BGC modellel. Időjárás (benyújtásra kész)
- Gilmanov, T.G., Soussana, J-F., Aires, L., Allard, V., Ammann, C., Balzarolo, M., Barcza, Z., Bernhofer, C., Campbell, C.L., Cernusca, A., Cescatti, A., Clifton-Brown, J., Dirks, B.O.M., Dore, S., Eugster, W., Fuhrer, J., Gimeno, C., Gruenwald, T., Haszpra, L., Hensen, A., Ibrom, A., Jacobs, A.F.G., Jones, M.B., Lanigan, G., Laurila, T., Lohila, A., Manca, G., Marcolla, B., Nagy, Z., Pilegaard, K., Pinter, K., Pio, C., Raschi, A., Rogiers, N., Sanz, M.J., Stefani, P., Sutton, M., Tuba, Z., Valentini, R., Williams, M.L., Wohlfahrt, G., 2007: Partitioning European grassland net ecosystem CO₂ exchange into gross primary productivity and ecosystem respiration using light response function analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 121, 93-120.
- Haszpra, L., 1999: On the representativeness of carbon dioxide measurements. *J. of Geophysical Research* 104D, 26953-26960.
- Haszpra L., 2005: Magyarországi felszíni és magas mérőtornyos légköri szén-dioxid mérések. MTA Doktori Értekezés.
- Haszpra L., 2007: A légköri szén-dioxid mérések negyed százada Magyarországon (1981-2006). *Légkör* 52/1, 4-8.
- Haszpra L. és Barcza Z., 2005a: A magyarországi légköri szén-dioxid mérések szerepe az éghajlati modellek megalapozásában. "AGRO-21" Füzetek 38, 13-26.
- Haszpra L. és Barcza Z., 2005b: Légköri szén-dioxid mérések Magyarországon. *Magyar Tudomány* 50/1, 104-112.
- Haszpra L., Barcza, Z., 2006: CO₂ monitoring and research programs in Hungary. In: 13th WMO/IAEA meeting of experts on carbon dioxide concentration and related tracer

- measurement techniques, Boulder, Colorado, U.S.A., 19-23 September 2005 (ed.: Miller, J.). WMO GAW Report 168, 146-150.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Gloor, E., 2004: Tall tower observation systems in Hungary. Handbook of the 8th International Global Atmospheric Chemistry Conference, 4-9 September 2004, Christchurch, New Zealand, 153.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K., Tarczay, K., 2005a: Long term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology* 132, 58-77.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Hidy, D., Szabó, T., Tarczay, K., 2005b. Tall tower carbon budget monitoring and research programs in Hungary. In: Extended abstracts of the 7th International Carbon Dioxide Conference, Broomfield, Colorado, 26-30 September 2005. 481-482.
- Haszpra L., Barcza, Z., Tarczay, K., 2005c: National report on the Hungarian CO₂ monitoring and research programs. In: 12th WMO/IAEA meeting of experts on carbon dioxide concentration and related tracer measurement techniques, Toronto, Canada, 15-18 September 2003 (eds.: Worthy, D., Huang, L.). WMO GAW Report No. 161., 154-158.
- Haszpra L., Barcza Z., Hidy D., 2006a: A légköri szén-dioxid és az éghajlat kölcsönhatása. In: 31. Meteorológiai Tudományos Napok 2005 - Az éghajlat regionális módosulásának objektív becslését megalapozó klímadinamikai kutatások (Szerk.: Weidinger T.). Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 175-184.
- Haszpra, L., Barcza, Z., Tarczay, K., Ihász, I., 2006b: Estimation of the regional scale surface-atmosphere CO₂ flux in Hungary. In: Proceedings of the International Conference on Regional Carbon Budgets, 16-18 August 2006, Beijing, pp. 212-216.
- Haszpra, L., Hidy, D., Barcza, Z., Szilágyi, I., 2008: Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe. *Atmospheric Environment* (benyújtva)
- Hidy D., Barcza Z., Haszpra L., G. Churkina, 2006a: Gyepek szén-dioxid forgalmának modellezése. *Légkör* 51/3, 33-36.
- Hidy, D., Haszpra, L., Barcza, Z., Churkina, G., Trusilova, K., Tomelleri, E., 2006b: Bayesian calibration of the Biome-BGC C3 grass submodel. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 06831, 2006. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-06831. Abstracts of the EGS Assembly, EGU06-A-06880, Vienna, Austria.
- Hidy, D., Barcza, Z., Haszpra, L., Churkina, G., Trusilova, K., 2007: Parameter estimation for grassland carbon cycle using nonlinear inversion of Biome-BGC. *Cereal Research Communications* 35: 453-456. doi: 10.1556/CRC.35.2007.2.72.
- Hidy, D., Nagy, Z., Haszpra, L., Barcza, Z., 2008: Modelling of carbon isotope discrimination by vegetation. *Photosynthetica* (benyújtásra előkészítve).

- Ramonet, M., Haszpra, L., Katrynski, K., Moncrieff, J., Schmidt, M., Xueref, I., Bousquet, P. and Ciais, P., 2005: Vertical aircraft profiles over Europe. In: Extended abstracts of the 7th International Carbon Dioxide Conference, Broomfield, Colorado, 26-30 September 2005. 343.
- Schmid, H. P., 1994: Source areas for scalars and scalar fluxes. *Boundary-Layer Meteorology* 67, 293-318.
- Schmid, H. P., 1997: Experimental design for flux measurements: matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology* 87, 179-200.
- Sirignano, C., Neubert, R. E. M., Varlagin, A., Haszpra, L., Neininger, B. and Meijer, H. A. J., 2005: Atmospheric oxygen and CO₂ flask concentration measurements from ground and aircraft sites in Europe. In: Extended abstracts of the 7th International Carbon Dioxide Conference, Broomfield, Colorado, 26-30 September 2005. 367-368.
- Szabó, T., Haszpra, L., Barcza, Z., Aalto, T., 2006. Variability in atmospheric CO₂ mixing ratio reflected by tall tower measurements. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 07566, 2006. EGU General Assembly 2006, Vienna, Austria, 02-07 April, 2006. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-07566
- Tarczay, K., Hidy, D., Szabó, T., Haszpra, L., Barcza, Z., 2005: New tools to study the biosphere/atmosphere CO₂ exchange in Hegyhátsál. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 7, 01165. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU05-A-01165. Abstracts of the EGS Assembly, EGU05-A-01165, 25-29 April, 2005, Vienna, Austria.
- Tarczay, K., Haszpra, L., Barcza, Z., 2006: Daily boundary layer budget estimates of carbon dioxide using tall tower data. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, 06880, 2006. SRef-ID: 1607-7962/gra/EGU06-A-06880. Abstracts of the EGS Assembly, EGU06-A-06880, Vienna, Austria.
- Vermeulen, A. T., Pieterse, G., Manning, A., Schmidt, M., Haszpra, L., Popa, E., Thompson, R., Moncrieff, J., Lindroth, A., Stefani, P., Morguá, J., Moors, E., Neubert, R., Gloor, M., 2006: The CHIOTTO tall tower network: its setup and results. In: Open Science Conference on the GHG Cycle in the Northern Hemisphere, November 14-18, 2006, Sissi-Lassithi, Crete, Greece, pp. 12.

MELLÉKLET

A T02941 számú OTKA kutatási téma munkaterve

- 2003: Folytatjuk az előző években Hegyhátsálon megkezdett CO₂ koncentráció-profil és függőleges CO₂ áram méréseket. A mért adatokat hozzáférhetővé tesszük a nemzetközi kutatási programok számára. A környezeti viszonyok (hőmérséklet, talajnedvesség, besugárzás és évi menetük) nettó szénforgalomra gyakorolt hatásának meghatározásához megkezdjük a talajhőmérséklet, talajnedvesség és talaj-hőfluxus méréseket. Az antropogén és természetes eredetű CO₂ megkülönböztetésére a Groningeni Egyetem kutatóival közösen alkalmi izotóp-összetétel vizsgálatokat végzünk. Az antropogén hatás potenciális indikátoraként megkezdjük a szén-monoxid mérést a mérőhelyen. Részvétel a WMO 12. CO₂ Szakértői értekezletén (Toronto, Kanada)
- 2004: Az előző évben megkezdett mérések folytatása. Felkészülés néhány nem-CO₂ üvegházgáz koncentrációjának mérésére. A 2003-ban végzett izotópösszetétel mérések értékelése. Egyszerű box-modell segítségével megpróbálunk közelítő felszín-légkör kicserélődési adatokat előállítani a mérőtoronnyal és közvetlen CO₂ áram mérésekkel nem rendelkező K-pusztai, illetve a közvetlen áramméréseket is végző hegyhátsági mérőállomásra. A módszer használhatóságának értékelése.
- 2005: A mérések folytatása. Forrásterület modell kifejlesztésével megvizsgáljuk a függőleges CO₂ áram mérések által reprezentált területek elhelyezkedését, és a lefedett területek hozzájárulását a mért áramokhoz. Kísérletet teszünk az eredmények regionális skálán történő értelmezésére. Az elért eredmények publikálása. Részvétel a 7. Nemzetközi CO₂ Konferencián és a WMO 13. CO₂ Szakértői értekezletén (Amerikai Egyesült Államok).
- 2006: Feldolgozzuk az Amerikai Egyesült Államok Nemzeti Óceán- és Légkörkutató Hivatalával (NOAA) közösen végzett metán és dinitrogén-oxid méréseket, meghatározzuk ezen légköri nyomanyagok trendjét, növekedési ütemük időbeli változásait. Értékeljük a környezeti viszonyok és a mért bioszféra/légkör szén-dioxid forgalom kapcsolatát. Az elért eredmények publikálása.